



# **Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

**Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica**

**Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica**

## **Influencia de microburbujas de oxígeno en el proceso de cianuración en columnas para mejorar la recuperación de oro y plata en minera La Zanja – Compañía de Minas Buenaventura**

### **TESIS**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico**

### **AUTOR**

**Pedro Daniel AQUINO AQUINO**

**Lima, Perú**

**2019**



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Aquino, N. (2019). *Influencia de microburbujas de oxígeno en el proceso de cianuración en columnas para mejorar la recuperación de oro y plata en minera La Zanja – Compañía de Minas Buenaventura*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
Universidad del Perú. Decana de América  
**Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica**

"Año de lucha contra la corrupción e impunidad"

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**

En el Salón de Grados de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, el día martes 07 de mayo del año 2019, siendo las 5:00 p.m. en presencia de los señores docentes designados como miembros del Jurado Calificador:

- Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RÍOS	Presidente
- Ing. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR	Miembro
- Ing. MANUEL LEONARDO CABRERA SANDOVAL	Miembro

Reunidos para el acto académico Público de Colación de Tesis de don: PEDRO DANIEL AQUINO AQUINO Bachiller en Ingeniería Metalúrgica quien sustentará la Tesis titulada "INFLUENCIA DE MICROBURBUJAS DE OXÍGENO EN EL PROCESO DE CIANURACIÓN EN COLUMNAS PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE ORO Y PLATA EN MINERA LA ZANJA-COMPAÑÍA DE MINAS BUENAVENTURA.", para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico.

Los miembros del Jurado, escuchada la colación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

SATISFACCION

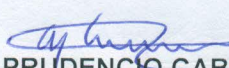
El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

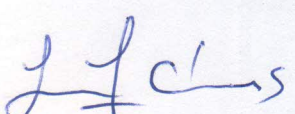
DIECISIETE (17)

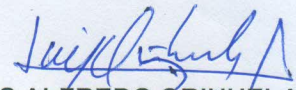
Habiendo sido aprobada la Sustentación de Tesis por el Jurado examinador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico a don PEDRO DANIEL AQUINO AQUINO.

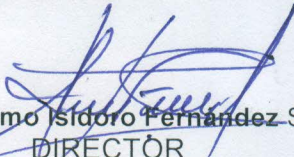
Siendo las 18:00 horas se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la sustentación de Tesis.

Ciudad Universitaria, 07 de mayo 2019.

  
ING. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RÍOS  
Presidente

  
ING. MANUEL LEONARDO CABRERA SANDOVAL  
Miembro

  
ING. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR  
Miembro

  
Mg. Sósimo Sidorio Fernández Salazar  
DIRECTOR  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



No tengo ningún talento en especial. Sólo soy apasionadamente curioso

Albert Einstein

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A mis padres**

Benigno Aquino y Melania Aquino por su dedicación, su apoyo, sus consejos, por la motivación que me han permitido ser un gran profesional, pero más que nada me han permitido ser una persona de bien.

### **A mis compañeros de trabajo**

Robinson Paredes, Robert Montes, Eddy Cruz , Nixon Rodas y Gregorio Abanto por su ayuda desde el inicio hasta el final en la elaboración de esta tesis.

# ÍNDICE

INDICE DE FIGURAS .....	6
INDICE DE TABLAS.....	10
RESUMEN .....	12
ABSTRACT .....	14
GLOSARIO .....	16
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
2.1 Situación Problemática .....	3
2.2 Formulación del Problema .....	3
2.3 Justificación de la Investigación .....	4
2.4 Objetivos.....	4
2.4.1 Objetivo General. ....	4
2.4.2 Objetivos Específicos. ....	4
2.4 Hipótesis.....	4
CAPÍTULO 3 MARCO TEÓRICO .....	5
3.1 Química de la lixiviación del oro y plata .....	5
3.1.1 Química de la solución de cianuro.....	5
3.1.2 Química de la lixiviación del oro. ....	6
3.1.3 Química de lixiviación de la plata.....	7
3.2 Cinética de la reacción de lixiviación.....	8
3.2.1 Cinética de disolución.....	10
3.2.2 Modelo matemático de la disolución .....	10
3.3 Efecto del oxígeno en el proceso de cianuración.....	15
CAPÍTULO 4 PRUEBAS METALÚRGICAS A NIVEL DE LABORATORIO .....	19



4.1 Parte 1 - Pruebas de comportamiento del oxígeno en solución de cianuro.....	20
4.1.1 Pruebas de inyección de aire .....	20
4.1.2 Pruebas de inyección de oxígeno .....	27
4.2 Parte 2 - Pruebas de lixiviación con solución oxigenada.....	39
 CAPÍTULO 5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	58
5.1 Resultados de pruebas de oxigenación.....	58
5.1.1 Resultados de pruebas con inyección de aire .....	58
5.1.2 Resultados de pruebas de inyección de oxígeno .....	58
5.2 Resultados de las pruebas en columnas.....	60
 CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	65
CONCLUSIONES .....	65
RECOMENDACIONES .....	67
 BIBLIOGRAFÍA .....	68
 ANEXOS .....	71



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Presencia del ion cianuro y el ácido cianhídrico en solución acuosa en función del pH.....	6
Figura 2. Mecanismo de disolución de la plata en cianuro.....	8
Figura 3. Modelo electroquímico para la cianuración de oro.....	11
Figura 4. Ratio de disolución de discos de oro bajo la influencia de oxígeno en la solución de lixiviación.....	16
Figura 5. Ejemplo de extracción de oro de una calcina con contenido de oro.....	16
Figura 6. Diagrama de proceso de pruebas de lixiviación.....	17
Figura 7. Concentración de oxígeno vs tiempo – Prueba con aire #1.....	22
Figura 8. Fuerza de cianuro vs tiempo – Prueba con aire #1.....	22
Figura 9. Concentración de oxígeno vs tiempo – Prueba con aire #2.....	24
Figura 10. Fuerza de cianuro vs tiempo – Prueba con aire #2.....	24
Figura 11. Concentración de oxígeno vs tiempo – Prueba con aire #3.....	26
Figura 12. Fuerza de cianuro vs tiempo – Prueba con aire #3.....	26
Figura 13. Concentración de oxígeno vs tiempo – Prueba con oxígeno #1.....	28
Figura 14. Fuerza de cianuro vs tiempo – Prueba con oxígeno #1.....	28
Figura 15. Concentración de oxígeno vs tiempo – Prueba con oxígeno #2.....	30
Figura 16. Fuerza de cianuro vs tiempo – Prueba con oxígeno #2.....	30

Figura 17. Concentración de oxígeno vs tiempo – Prueba con oxígeno #3.....	32
Figura 18. Fuerza de cianuro vs tiempo – Prueba con oxígeno #3.....	32
Figura 19. Concentración de oxígeno vs tiempo – Prueba con oxígeno #4.....	34
Figura 20. Fuerza de cianuro vs tiempo – Prueba con oxígeno #4.....	34
Figura 21. Concentración de oxígeno vs tiempo – Prueba con oxígeno #5.....	36
Figura 22. Fuerza de cianuro vs tiempo – Prueba con oxígeno #5.....	36
Figura 23. Concentración de oxígeno vs tiempo – Prueba con oxígeno #6.....	38
Figura 24. Fuerza de cianuro vs tiempo – Prueba con oxígeno #6.....	38
Figura 25. Extracción de oro vs ratio de riego para PC 262 y PC 263.....	40
Figura 26. Extracción de plata vs ratio de riego para PC 262 y PC 263.....	41
Figura 27. Extracción de oro vs tiempo para PC 262 y PC 263.....	41
Figura 28. Extracción de plata vs tiempo para PC 262 y PC 263.....	42
Figura 29. Extracción de oro vs ratio de riego para PC 268 y PC 269.....	44
Figura 30. Extracción de plata vs ratio de riego para PC 268 y PC 269.....	44
Figura 31. Extracción de oro vs tiempo para PC 268 y PC 269.....	45
Figura 32. Extracción de plata vs tiempo para PC 268 y PC 269.....	45
Figura 33. Extracción de oro vs ratio de riego para PC 280 y PC 282.....	47
Figura 34. Extracción de plata vs ratio de riego para PC 280 y PC 282.....	47
Figura 35. Extracción de oro vs tiempo para PC 280 y PC 282.....	48

Figura 36. Extracción de plata vs tiempo para PC 280 y PC 282.....	48
Figura 37. Extracción de oro vs ratio de riego para PC 265 y PC 266.....	50
Figura 38. Extracción de plata vs ratio de riego para PC 265 y PC 266.....	50
Figura 39. Extracción de oro vs tiempo para PC 265 y PC 266.....	51
Figura 40. Extracción de plata vs tiempo para PC 265 y PC 266.....	51
Figura 41. Extracción de oro vs ratio de riego para PC 270 y PC 271.....	53
Figura 42. Extracción de plata vs ratio de riego para PC 270 y PC 271.....	53
Figura 43. Extracción de oro vs tiempo para PC 270 y PC 271.....	54
Figura 44. Extracción de plata vs tiempo para PC 270 y PC 271.....	54
Figura 45. Extracción de oro vs ratio de riego para PC 281 y PC 283.....	56
Figura 46. Extracción de plata vs ratio de riego para PC 281 y PC 283.....	56
Figura 47. Extracción de oro vs tiempo para PC 281 y PC 283.....	57
Figura 48. Extracción de plata vs tiempo para PC 281 y PC 283.....	57
Figura 49. Homogenizado del mineral.....	71
Figura 50. Armado de columna de lixiviación.....	71
Figura 51. Mineral dentro de la columna.....	72
Figura 52. Bomba peristáltica y cabeza para la dosificación de cianuro.....	72
Figura 53. Inyección de oxígeno en solución de cianuro con cerámico de microporos.....	73
Figura 54. Contenedores de solución de cianuro.....	73

Figura 55. Sistema de regado de las columnas por goteo.....	74
Figura 56. Cerámico de microporos y medidor de presión.....	74
Figura 57. Cerámico con microporos.....	75
Figura 58. Columnas en proceso de lixiviación por goteo.....	75

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Velocidad de disolución a diferentes porcentajes de oxígeno.....	16
Tabla 2. Equilibrio de la concentración del oxígeno disuelto (aire) en agua a varias temperaturas y altitudes.....	18
Tabla 3. Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro para prueba 1 con aire.....	21
Tabla 4. Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro para prueba 2 con aire.....	23
Tabla 5. Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro para prueba 3 con aire.....	25
Tabla 6. Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro para prueba 1 con oxígeno.....	27
Tabla 7. Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro para prueba 2 con oxígeno.....	29
Tabla 8. Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro para prueba 3 con oxígeno.....	31
Tabla 9. Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro para prueba 4 con oxígeno.....	33
Tabla 10. Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro para prueba 5 con oxígeno.....	35
Tabla 11. Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro para prueba 6 con oxígeno.....	37

Tabla 12. Datos de cabeza ensayada para el mineral 100 % - 1" de las PC 262 y PC 263.....	39
Tabla 13. Balance de Cabeza calculada para PC 262 y PC 263.....	40
Tabla 14. Datos de cabeza ensayada para el mineral 100 % - 1" de las PC 268 y PC 269.....	43
Tabla 15. Balance de Cabeza calculada para PC 268 y PC 269.....	43
Tabla 16. Datos de cabeza ensayada para el mineral 100 % - 1" de las PC 280 y PC 282.....	46
Tabla 17. Balance de Cabeza calculada para PC 280 y PC 282.....	46
Tabla 18 Datos de cabeza ensayada para el mineral 100 % - 1" de las PC 265 y PC 266.....	49
Tabla 19. Balance de Cabeza calculada para PC 265 y PC 266.....	49
Tabla 20. Datos de cabeza ensayada para el mineral 100 % - 1" de las PC 270 y PC 271.....	52
Tabla 21. Balance de Cabeza calculada para PC 270 y PC 271.....	52
Tabla 22. Datos de cabeza ensayada para el mineral 100 % - 1" de las PC 281 y PC 283.....	55
Tabla 23. Balance de Cabeza calculada para las PC 281 y PC 283.....	55

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación demuestra la influencia de aumentar la concentración de oxígeno en forma de microburbujas en la solución de cianuro para la optimización del proceso de lixiviación para minerales de oro y plata en Minera La Zanja de la Compañía de Minas Buenaventura.

El trabajo se divide en dos partes, la primera es determinar la estabilidad del oxígeno en exceso en la solución de cianuro y si existe alguna disminución notable de la fuerza de cianuro. La segunda parte consiste en pruebas de lixiviación en columnas en las cuales se utiliza solución de cianuro con oxígeno sobresaturado y solución de cianuro a condiciones normales para lixiviar mineral fresco proveniente del tajo Pampa Verde y mineral ripio proveniente del PAD de lixiviación

En la primera parte de la investigación se realizaron 6 pruebas de inyección de aire y oxígeno mediante un cerámico con microporos que permitía inyectar el oxígeno en microburbujas y así tener una mejor difusión. El número de 6 pruebas fue limitado hasta obtener una concentración de aproximadamente 20 ppm de oxígeno en la solución de cianuro.

Los resultados mostraron que la inyección de aire continua no tiene un mayor efecto que subir la concentración de oxígeno en la primera prueba a 40 psi de presión desde 7.70 ppm hasta 8.49 ppm, en la segunda prueba a 50 psi de presión desde 7.85 ppm hasta 8.52 ppm y en la tercera prueba a 100 psi de presión desde 7.87 ppm hasta 8.46 ppm.

Con respecto a la inyección de oxígeno los resultados fueron más favorables mostrando para la primera prueba después de inyectar oxígeno en 3 veces por 3 minutos a 50 psi de presión la concentración subió desde 7.61 ppm hasta 17.66 ppm,



en la segunda prueba después de inyectar oxígeno en 3 veces por 5 minutos a 50 psi de presión la concentración subió desde 7.62 ppm hasta 18.51 ppm, en la tercera prueba después de inyectar oxígeno en 3 veces por 3 minutos a 100 psi la concentración subió desde 7.70 ppm hasta 18.55 ppm , en la cuarta prueba después de inyectar oxígeno en 3 veces por 5 minutos a 100 psi la concentración subió desde 7.67 ppm hasta 21.66 ppm , en la quinta prueba después de inyectar oxígeno en 3 veces por 3 minutos a 150 psi la concentración subió desde 7.45 ppm hasta 16.52 ppm y en la sexta prueba después de inyectar oxígeno en 3 oportunidad por 5 minutos a 150 psi la concentración subió desde 7.40 ppm hasta 25.40 ppm.

En la segunda parte se realizaron las pruebas de lixiviación en columnas, en total se realizaron 6 pares de pruebas, en la cual la primera columna se lixiviaba con solución de cianuro sin oxígeno y la segunda columna era regada con solución de cianuro oxigenada. Los 3 primeros pares de pruebas se realizó con mineral fresco que se obtuvo del compósito del mineral depositado en el PAD durante los meses de septiembre, octubre y noviembre. Los 3 últimos pares se realizaron con el compósito de mineral ripio proveniente de los lift 7, 8 y 9.

Para el mineral fresco la tercera prueba fue en la que se obtuvo mejores resultados, la ley del mineral era de 0.277 gr/TM de oro y 2.08 gr/TM de plata obteniendo aumentos de recuperación de 8.35 % para el oro y 6.28 % para la plata.

Para el caso del mineral ripio en la cuarta y sexta prueba fueron en se obtuvieron mejores resultados, las leyes de oro en el mineral eran 0.068 gr/TM y 0.093 gr/TM y el aumento de recuperación fue de 3.8% para ambos casos , en el caso de la plata el mejor resulta se obtuvo en la quinta prueba , la ley de plata era de 2.09 gr/TM y el aumento de la recuperación fue de 1.3%.

## **ABSTRACT**

The present research work demonstrates the influence of increasing the concentration of oxygen in the form of microbubbles in the cyanide solution for the optimization of the leaching process for gold and silver minerals in Minera La Zanja of the Compañía de Minas Buenaventura.

The work is divided into two parts, the first is to determine the stability of excess oxygen in the cyanide solution and if there is any noticeable decrease in cyanide strength. The second part consists of leaching tests in columns in which cyanide solution is used with supersaturated oxygen and cyanide solution at normal conditions to leach fresh mineral from the Pampa Verde pit and gravel ore from the leaching PAD

In the first part of the investigation 6 air and oxygen injection tests were performed using a ceramic with micropores that allowed to inject the oxygen into microbubbles and thus have a better diffusion. The number of 6 tests was limited until obtaining a concentration of approximately 20 ppm of oxygen in the cyanide solution.

The results showed that continuous air injection has no greater effect than raising the oxygen concentration in the first test at 40 psi pressure from 7.70 ppm to 8.49 ppm, in the second test at 50 psi pressure from 7.85 ppm to 8.52 ppm and in the third test at 100 psi pressure from 7.87 ppm to 8.46 ppm.

With regard to oxygen injection the results were more favorable showing for the first test after injecting oxygen in 3 times for 3 minutes at 50 psi pressure the concentration rose from 7.61 ppm to 17.66 ppm, in the second test after injecting oxygen in 3 times for 5 minutes at 50 psi pressure the concentration rose from 7.62 ppm to 18.51 ppm, in the third test after injecting oxygen 3 times for 3 minutes at 100 psi the concentration rose from 7.70 ppm to 18.55 ppm, in the fourth test after injecting oxygen 3 times for

5 minutes at 100 psi the concentration rose from 7.67 ppm to 21.66 ppm, in the fifth test after injecting oxygen 3 times for 3 minutes at 150 psi the concentration went up from 7.45 ppm to 16.52 ppm and in the sixth test after injecting oxygen at 3 times for 5 minutes at 150 psi the concentration increased from 7.40 ppm to 25.40 ppm.

In the second part, leaching tests were performed on columns, in total 6 pairs of tests were performed, in which the first column was leached with cyanide solution without oxygen and the second column was irrigated with oxygenated cyanide solution. The first 3 pairs of tests were made with fresh mineral that was obtained from the composite of the mineral deposited in the PAD during the months of September, October and November. The last 3 pairs were made with the gravel mineral composite from the lift 7, 8 and 9.

For the fresh mineral, the third test was the one with the best results, the ore grade was 0.277 gr / MT of gold and 2.08 gr / MT of silver, obtaining recovery increases of 8.35% for gold and 6.28% for gold. silver.

In the case of the gravel ore in the fourth and sixth tests, the best results were obtained, the gold grades in the ore were 0.068 gr / TM and 0.093 gr / MT and the recovery increase was 3.8% for both cases, in In the case of silver, the best result was obtained in the fifth test, the silver grade was 2.09 gr / MT and the increase in recovery was 1.3%.

## GLOSARIO

**Área anódica:** Zonas del mineral, donde ocurren reacciones de oxidación

**Área catódica:** Zonas del mineral donde ocurren reacciones de reducción

**Cianuración:** Proceso químico de disolución de metales preciosos que se realiza gracias al efecto del cianuro

**Cianuro de sodio:** Compuesto sólido e incoloro utilizado en procesos de extracción de metales preciosos.

**Columna de lixiviación:** Columna de diámetro interno de cuatro pulgadas que se utilizan en pruebas de cianuración.

**Distribución granulométrica:** Clasificación en porcentajes de los diferentes tamaños del mineral.

Extracción de Oro : Es la relación entre la cantidad de oro recuperada en la solución pregnant entre la cantidad de oro total en el mineral , se expresa en porcentaje ( % )

Extracción de plata: Es la relación entre la cantidad de plata recuperada en la solución pregnant y la cantidad de plata total en el mineral , se expresa en porcentaje

**Fuerza de cianuro:** Concentración en solución del cianuro que se expresa normalmente en ppm

**Ley de cabeza calculada:** Contenido metálico presente en un mineral que se calcula sumando los contenidos metálicos totales de la solución pregnant y el contenido metálico en el mineral ripio.

**Ley de cabeza ensayada:** Contenido metálico presente en un mineral que se obtiene por análisis químico.

**Lift:** Nivel o piso del PAD

**Mineral fresco:** Mineral proveniente del tajo

**Mineral ripio:** Mineral con bajo contenido de metales preciosos debido a que ha pasado por el proceso de cianuración.

**Ratio de riego:** Relación entre el volumen de solución de cianuro regada con el tiempo de regado y el área de mineral regada, se expresa en litros por hora metro cuadrado (  $L / h.m^2$  )

**Ratio solución mineral (S/M):** Relación entre la cantidad de solución de cianuro regada entre la cantidad de mineral lixiviada, se expresa en metros cúbicos por tonelada métrica (  $m^3 / TM$  )

**Solución pregnant:** Solución con contenido de oro y plata que se obtiene como producto de la lixiviación del mineral, se expresa en partes por millón (ppm)

**Tiempo de regado:** Tiempo total por el cual se ha lixiviado el mineral.

**Tiosulfato de sodio:** Compuesto inorgánico que normalmente se encuentra pentahidratado

**Tiourea:** Compuesto orgánico de azufre

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad la producción anual de oro en el Perú es de 170 toneladas, ocupando así el quinto puesto a nivel mundial, siendo superado principalmente por países como China con una producción anual de 460 toneladas y Australia con una producción anual de 279 toneladas. [1]

Entre los diversos métodos de recuperación de oro, tenemos el proceso de Merrill Crowe, el cual es un proceso diseñado para la extracción de minerales de ley baja. Se basa en la cianuración de oro para formar complejos aurocianuro en solución para luego ser precipitados con la adición de polvo de zinc en la solución.

Ante el escenario actual de encontrarnos con minerales de ley baja en oro y plata se tiene la necesidad de optimizar el proceso de lixiviación y así obtener una mejor recuperación. De acuerdo con la química de lixiviación del oro el oxígeno juega un rol muy importante en la formación de los complejos aurocianuro. [3]

Dicho aumento de concentración no afectará a las etapas posteriores del proceso Merrill-Crowe ya que el oxígeno al estar sobresaturado en solución este pasará a estabilizarse a su concentración a condiciones normales.

Existen estudios previos realizados por parte de la CIA Minera San Simón, donde el aumento de oxígeno de solución se realizó mediante la instalación de tubos Venturi en las tuberías que llevan el cianuro al PAD.[2]

El oxígeno es uno de los agentes claves en la lixiviación convencional del oro y plata como se presenta en la ecuación de cianuración del oro. La concentración del oxígeno determina la reducción catódica del oxígeno. Puede ser sustituido por aire, oxígeno puro o aire enriquecido. La concentración de oxígeno está determinada por las

condiciones de presión y temperatura a las cuales operan los procesos. La concentración saturada de oxígeno para condiciones de 25°C es de 8.2 ppm [3]. Ellis y Seneyake (2004) habían sugerido que la inyección de oxígeno a presión alta en lugar del aire da una mayor solubilidad del oxígeno y logran una mejor extracción del oro. [4]

Una gran cantidad de pequeñas burbujas de oxígeno dispersas en la lechada durante el tiempo suficiente y lo suficientemente profundo dan la concentración de oxígeno adecuada para la disolución del oro [5].

Las microburbujas, por ser de tamaño muy pequeño tienen características particulares como una alta presión interna que permite su estabilidad en tamaño y número, gran superficie específica [22,23] , esta propiedad de las microbubujas permite una mayor difusión en la solución por lo cual no se necesitara tener una agitación al momento de la oxigenación de la solución.



## CAPÍTULO 2

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1 Situación Problemática

En la búsqueda de mejorar de la recuperación de oro se han utilizado diversos métodos, de los cuales podemos mencionar:

- Determinar la granulometría adecuada para el mineral
- Determinar la fuerza de cianuro adecuada para extraer la mayor cantidad de oro y plata.
- Elegir la manera más efectiva de dosificar el cianuro en el PAD

Actualmente en Minera La Zanja, la ley de oro del mineral depositado en el PAD está en valores entre 0.3 gr/TM y 0.4 gr/TM mientras que la concentración de oro en la solución que entra a planta está dentro de los valores de 0.2 ppm y 0.15 ppm , siendo en sus inicios los valores de las leyes entre 0.45 gr/TM y 0.50 gr/TM en el PAD y la concentración de solución cianurada tenía valores entre 0.35 ppm a 0.50 ppm ante este escenario es conveniente mejorar el proceso de lixiviación para aumentar la recuperación del oro y en menor grado aumentar la recuperación de la plata

De acuerdo con la química de la reacción del oro es fácil poder ver que el oxígeno juega un rol importante en la formación de los complejos oro-cianuro por consiguiente se tiene que al aumentar la concentración de este elemento en la solución lixivante se puede incrementar la recuperación del oro y plata.[3]

#### 2.2 Formulación del Problema

¿Cómo influye la presencia de microburbujas de oxígeno en la recuperación de oro y plata para minerales frescos y ripios de la Zanja?

## **2.3 Justificación de la Investigación**

1.-El presente trabajo se justifica porque permitirá demostrar que al aumentar la concentración de oxígeno en la solución de cianuro mejorando su difusión con la inyección de microburbujas de oxígeno, aumentará la recuperación de oro y plata con el fin de poder tener una mayor concentración de estos metales en la solución cianurada que ingresa a la planta de procesos.

2.-Reducir los ratios y días de riego, lo que se traduce en un menor gasto de reactivos para la cianuración y mayor efectividad en la percolación de la solución de cianuro.

## **2.4 Objetivos**

### **2.4.1 Objetivo General.**

- Mejorar la recuperación del oro y plata mediante la inyección de microburbujas de oxígeno en el proceso de cianuración en columnas.

### **2.4.2 Objetivos Específicos.**

- Determinar si existe alguna diferencia entre la inyección de aire y de oxígeno en la solución de cianuro, al evaluar la concentración de oxígeno, la fuerza de cianuro y pH.
- Determinar los tiempos y presión óptima de inyección de oxígeno para la ejecución de pruebas en columna de cianuración.
- Determinar si existe algún efecto similar en el aumento de la recuperación para el caso de mineral ripio.

## **2.4 Hipótesis**

La inyección de microburbujas de oxígeno en el proceso de cianuración en columnas aumentará la recuperación de oro y plata en la empresa minera La Zanja.

## CAPÍTULO 3

### MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Química de la lixiviación del oro y plata

El proceso de cianuración de oro y plata consiste en la disolución de estos elementos contenidos en minerales de baja ley, para este propósito se tienen muchas alternativas como por ejemplo la tiourea y los tiosulfatos que tienen una gran eficiencia en la extracción de dichos metales, sin embargo, el inconveniente de estos compuestos es su baja estabilidad en solución.[1]

A comparación de la tiourea y tiosulfato el cianuro de sodio posee una menor efectividad en la extracción de oro y plata pero una mayor estabilidad es por eso que operativamente el cianuro de sodio es altamente utilizado en las operaciones de lixiviación de oro.[3]

##### 3.1.1 Química de la solución de cianuro

El cianuro de sodio al ser disuelto en agua y formar una solución acuosa se descompone de acuerdo con la siguiente reacción:



El anión de cianuro ( $\text{CN}^-$ ) se hidroliza en el agua para formar ácido cianhídrico y iones hidróxido, lo que provoca un incremento en el pH. [3]

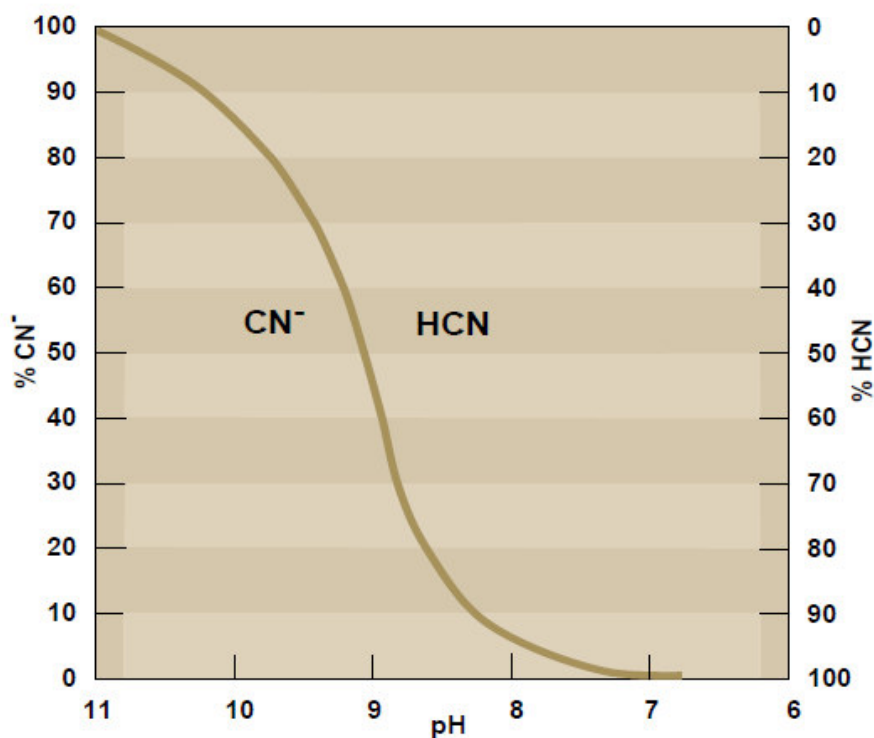


El ácido cianhídrico es un ácido débil, que se descompone completamente en agua de acuerdo con la siguiente reacción. [6]



En la figura 1 se puede observar la estabilidad del  $\text{CN}^-$  y  $\text{HCN}$  de acuerdo con el pH en el que se encuentre la solución.

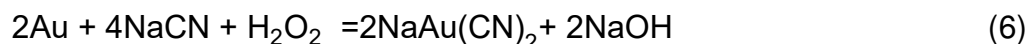
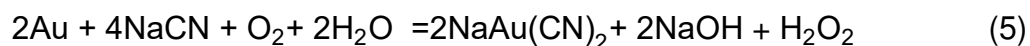
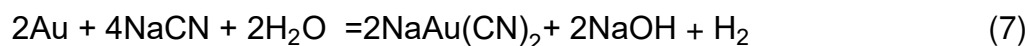
**Figura 1. Presencia del ion cianuro y el ácido cianhídrico en solución acuosa en función del pH.**



Fuente :Smith,R.M & A.E Martell (1976) [4]

### 3.1.2 Química de la lixiviación del oro.

El oro presente en los minerales que son sometidos a los procesos de lixiviación que están en estado sólido a solución en forma de iones, la ecuación química que describe este proceso ha sido interpretada de diferente manera por 3 autores: Elsner, Bodländer y McArthur-Forrest

**Ecuación de Elsner:****Ecuación de Bödlander****Ecuación de McArthur-Forrest**

La reacción global de las ecuaciones propuestas por Bodlander es la misma ecuación propuesta por Elsner, la cual es aceptada como la reacción estándar de la cianuración de oro. [7]

Según la termodinámica no es posible la ecuación de McArthur-Forrest debido a que no se produce  $\text{H}_2$ , esto hace más viable la ecuación propuesta por Elsner en la cual el  $\text{O}_2$  juega un rol fundamental. [8]

**3.1.3 Química de lixiviación de la plata**

Kirt propone para la disolución anódica de la plata las siguientes reacciones en la formación del complejo de plata. [9]



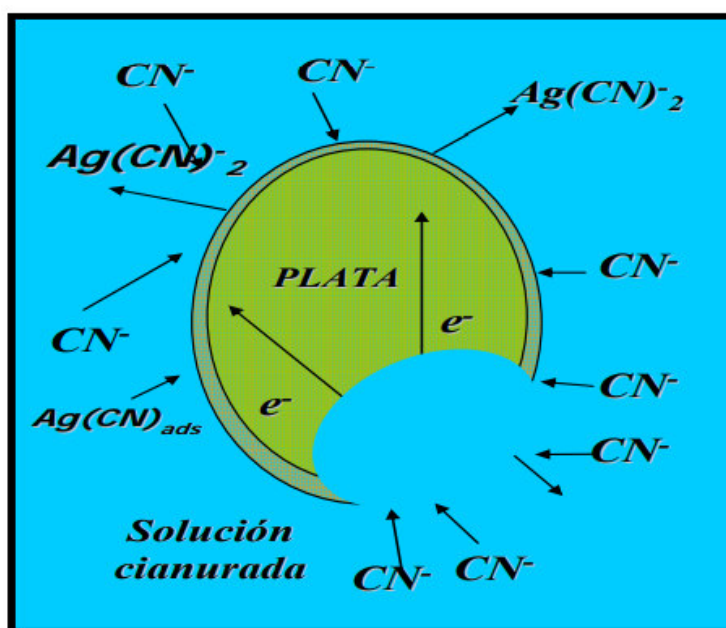
La figura 2 resume el mecanismo de formación de complejos de plata en las soluciones de cianuro. Primero en la cianuración ocurre la formación de un complejo de  $\text{AgCN}^-$  que es adsorbido sobre la superficie del metal, luego este

complejo adsorbido reacciona con el cianuro libre en exceso y forma el complejo estable  $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$  [9].

De acuerdo las reacciones que ocurren en la cianuración de la plata se puede tener la reacción total de dicho proceso.



**Figura 2. Mecanismo de disolución de la plata en cianuro.**



Fuente: Higuera Cobos Oscar Fabian (2007). [7]

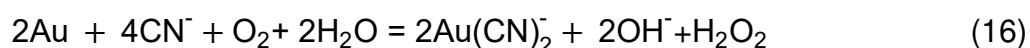
### 3.2 Cinética de la reacción de lixiviación

B. Boonstra dedujo que la disolución de oro en la cianuración tenía similitud a un proceso de corrosión electroquímica, en el cual el oxígeno disuelto en la solución se reduce a iones hidroxilos y peróxido de hidrógeno, mientras que el oro se oxida permitiendo así finalmente la formación del ion aurocianuro. [10]

Así B. Boonstra plantea que el mecanismo de cianuración se da por las siguientes reacciones: [10]



De esta forma sumando las reacciones desde la ecuación 12 hasta la ecuación 15, se obtiene la reacción global del proceso [10]. La cual representa efectivamente la ecuación propuestas por Elsner y Bodlander.



De las reacciones y conceptos mostrados se puede concluir que la reacción de cianuración del oro queda establecida por 2 semirreacciones que establecen una parte anódica donde el oro es oxidado y una parte catódica donde el oxígeno es reducido.

La corriente anódica está limitada por la difusión de  $\text{CN}^-$  hacia la superficie, mientras que la corriente catódica está limitada por la velocidad de difusión de oxígeno y del ion cianuro que es directamente proporcional a la concentración de ellos en la solución y al aumento de la agitación para un estado estacionario. [11]

La velocidad de disolución de oro es directamente proporcional a la corriente o densidad de corriente en la reacción. [11]

En base a diferentes estudios, se puede deducir que la velocidad de disolución del oro está limitada por [11]:



- Velocidad de difusión del oxígeno por la capa límite.
- Velocidad de difusión del cianuro.
- Pasivación de la superficie del oro.

Cuando el proceso está controlado por difusión, la relación de concentraciones  $\text{CN}^-$  y  $\text{O}_2$  es importante[12].

- A bajas concentraciones de cianuro, la velocidad de disolución depende solamente de ella.
- A bajas concentraciones de oxígeno, la velocidad será proporcional a la concentración de oxígeno e independiente a la concentración de cianuro
- Pasivación de la superficie del oro.

### **3.2.1 Cinética de disolución**

Existen 3 métodos de investigación que son utilizados para estudiar el ratio de disolución del oro o plata en solución de cianuro. [12]

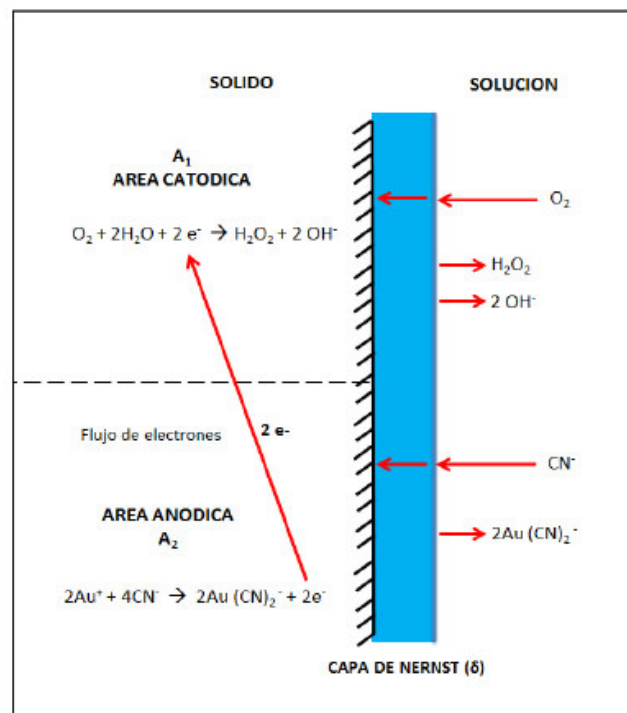
- Prueba de lámina de oro: En este proceso se mide el tiempo de disolución de una lámina de oro bajo ciertas condiciones iniciales de solución. [12]
- Método del disco: Midiendo el peso de metal disuelto por unidad de tiempo. [12]
- Medición de la densidad de corriente: Este método está basado en el principio de aplicar cierto potencial a un electrodo de oro, la densidad de corriente será proporcional al ratio de disolución. [12]

### **3.2.2 Modelo matemático de la disolución**

Muchos investigadores han intentado modelar la cinética de disolución de oro. Los discos de oro han sido utilizados en estudios fundamentales para

determinar ratios en un área de superficie constante, asumiendo que la rugosidad de la superficie no cambia mientras ocurre la reacción. Se concluyó que el ratio de disolución del oro puro depende de gran medida de la difusión de los iones de cianuro o de la concentración de oxígeno disuelto que se difunden hacia la superficie del oro. [12,13]

**Figura 3. Modelo electroquímico para la cianuración de oro.**



**Fuente: Luna Cordova Henry (2016). [9]**

Para el desarrollo de las ecuaciones, se parte de la ley de Fick para la difusión del oxígeno y el cianuro hacia la superficie del oro (interfase) bajo condiciones de estado estacionario, lo que nos da:

$$\frac{dO_2}{dt} = \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 \{ [O_2] - [O_2]_i \} \quad (17)$$

$$\frac{dCN^-}{dt} = \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 \{ [CN^-] - [CN^-]_i \} \quad (18)$$

Donde:

$D_{O_2}$  ,  $D_{CN^-}$  : Coeficientes de difusión del oxígeno y los iones de cianuro.

$\frac{dO_2}{dt}$  ,  $\frac{dCN^-}{dt}$ : Velocidades de difusiones del oxígeno disuelto y los iones cianuro.

$[O_2]$  ,  $[O_2]_i$  ,  $[CN^-]$  ,  $[CN^-]_i$  : Concentraciones (mol/Lt) de oxígeno disuelto y los iones cianuro en el seno de la solución y la interfaz de reacción.

$A_1$  ,  $A_2$ : Áreas superficiales donde ocurre la reacción

$\delta$ : Espesor de la capa límite, en cm.

Para el caso del control difusional, donde la difusión es el mecanismo limitante o el paso más lento, es posible asumir que las reacciones químicas en la superficie del oro son demasiado rápidas en comparación con las velocidades a las cuales los iones oxígeno y cianuro se difunden a través de la capa límite. De esta forma las concentraciones en la interfase del mineral pueden ser consideradas como cero, es decir:  $[O_2]_i = 0$  ,  $[CN^-]_i = 0$ .

De esto tenemos:

$$\frac{dO_2}{dt} = \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 \{ [O_2] \} \quad (19)$$

$$\frac{dCN^-}{dt} = \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 \{ [CN^-] \} \quad (20)$$

La relación molar se puede verificar en la reacción de lixiviación y se puede deducir que para que reaccionan 2 moles de oro se necesitan 4 moles de ion cianuro y 1 mol de oxígeno.

$$2 \frac{dO_2}{dt} = 2 \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 \{ [O_2] \} \quad (21)$$

$$\frac{1}{2} \frac{dCN^-}{dt} = \frac{1}{2} \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 \{ [CN^-] \} \quad (22)$$

Se debe considerar que para efectos de estos cálculos debido a que las condiciones son en estado estacionario, las reacciones catódicas y anódicas deben tener la misma velocidad.

$$2 \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 \{ [O_2] \} = \frac{1}{2} \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 \{ [CN^-] \} \quad (23)$$

Se considera también que el área de interfase total es relevante para la disolución de oro, por lo tanto,  $A_t = A_1 + A_2$ .

Reemplazando tenemos

$$\text{Velocidad de disolución} = - \frac{dN_{Au}}{A dt} = \frac{2 D_{O_2} D_{CN^-} [O_2] [CN^-]}{\delta (D_{CN^-} [CN^-] + 4 D_{O_2} [O_2])} \quad (24)$$

De la ecuación 22 se deduce que  $D_{CN^-} - [CN^-] < 4 D_{O_2} [O_2]$  o a baja concentración de cianuro, la velocidad de disolución depende principalmente de la concentración del cianuro. [4]

$$- \frac{dN_{Au}}{A dt} = \frac{D_{CN^-} [CN^-]}{2 \delta} = k_{CN^-} C_{CN^-} \quad (25)$$

Donde:

$k_{CN^-}$ : constante de difusión, s-1

Similarmente en altas concentraciones de cianuro, la disolución del oro dependerá de la concentración de oxígeno. [4]

$$- \frac{dN_{Au}}{A dt} = \frac{2 D_{O_2} [O_2]}{\delta} = k_{O_2} C_{O_2} \quad (26)$$

Donde:

$k_{O_2}$ : constante de difusión, s-1

En la práctica, se prefiere mantener altas concentraciones de cianuro que altos niveles de concentración de oxígeno en solución. Como consecuencia la mayoría de las minas operan a niveles de cianuro tales que la disolución de oro depende del oxígeno disuelto. [13]. Sin embargo, el uso de las ecuaciones 25 y 26 es limitado para la aplicación en los procesos industriales debido a la dificultad de medir exactamente el área superficial del oro en el mineral y el espesor de la capa límite de Nerst. [14]

Otra ecuación, de segundo orden fue propuesta por Nicol, M.J Fleming y Cromberge como se presenta en la ecuación 27. Esta ecuación es llamada la ecuación de Mintek fue presentada como una ecuación empírica basada en el comportamiento de la lixiviación de varios minerales de oro provenientes de Sudáfrica. [14,15]

$$-\frac{dC_{Au}}{Adt} = k(C_{Au} - C_{Au}^{\infty})^2 \quad (27)$$

Donde:

K: constante de velocidad universal

$C_{Au}$ : Concentración de oro en las partículas

$C_{\infty}$ : Concentración de oro en las partículas después de un tiempo infinito de lixiviación

Ling en 1996 propuso una ecuación para el caso de un mineral de comportamiento pseudohomogeneo. Esta ecuación puede ser expresada en términos de masa por masa en lugar de expresarla en masa por superficie de área del oro. [4]

$$-\frac{dC_{Au}}{Adt} = kC_{CN}^{\alpha}C_{O_2}^{\beta}(C_{Au}-C_{Au}^{\infty})^{\gamma} \quad (28)$$

Donde:

$C_{Au}$ : Concentración de oro en las partículas

$C_{Au}^{\infty}$ : Concentración de oro en las partículas después de un tiempo infinito de lixiviación.

$C_{CN}$ : Concentración de cianuro

$C_{O_2}$ : Concentración de oxígeno

$k$ : Constante de velocidad global, las unidades dependen de el orden de la reacción

$\alpha$ : Orden de reacción para el cianuro

$\beta$ : Orden de reacción para el oxígeno

$\gamma$ : Orden de reacción para el oro

### 3.3 Efecto del oxígeno en el proceso de cianuración

El uso de oxígeno o un agente oxidante, es primordial para que ocurra la disolución por cianuración. [16]

Barsky y Hedley determinaron que la velocidad de disolución del oro en soluciones con 1.0 gr/Lt NaCN utilizando nitrógeno, oxígeno y mezclas de otros gases; los resultados se muestran en la siguiente tabla. [16]

**Tabla 1. Velocidad de disolución a diferentes porcentajes de oxígeno.**

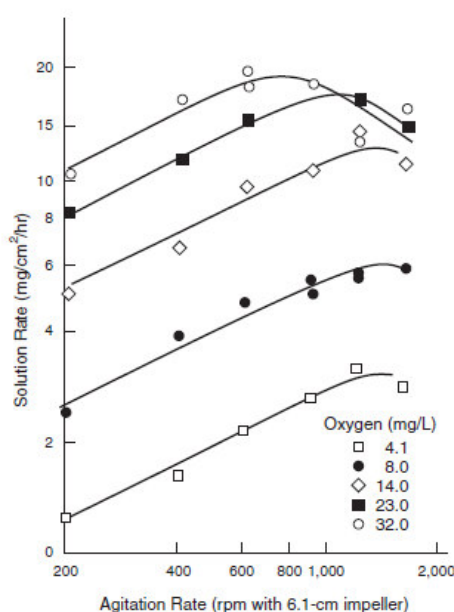
% OXÍGENO EN MEZCLA	VELOCIDAD DE DISOLUCIÓN. mg/h/cm <sup>2</sup>
0.0	0.04
9.6	1.03
20.9	2.36
60.1	7.62
99.5	12.62

**Fuente: Marchese , Adolfo (2003). [14]**

Los datos demuestran que la velocidad de disolución es directamente proporcional a la pureza del oxígeno, y, por lo tanto, a su presión parcial, que está en evidente relación con la concentración del oxígeno en la solución. [16]

El efecto del oxígeno disuelto en la velocidad de disolución de discos de oro se puede observar en la figura. En este cuando se incrementa la concentración de oxígeno disuelto se incrementa la velocidad de disolución, hasta un máximo de 32mg/Lt en las pruebas, bajo la condición de altas concentraciones de cianuro [4]

**Figura 4. Ratio de disolución de discos de oro bajo la influencia de oxígeno en la solución de lixiviación.**

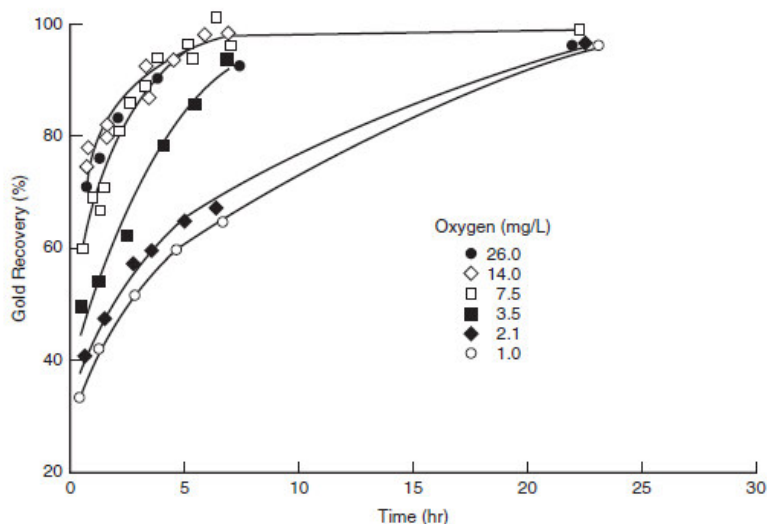


**Fuente : Cathro, K.J & A.Walkley (1961). [15]**



Este efecto se muestra más detalladamente en la figura 5 Para una lixiviación de una calcina que contiene oro.

**Figura 5. Ejemplo de extracción de oro de una calcina con contenido de oro.**



. Fuente : Cathro, K.J & D.F.A Koch (1961). [15]

Aunque esto muestra el efecto beneficioso de la concentración de oxígeno disuelto sobre la velocidad de disolución, también indica que se logran extracciones de oro finales similares si los tiempos de lixiviación se extienden a las concentraciones de oxígeno más bajas. Esto es una importante consideración, y el costo de incrementar la concentración del oxígeno debe considerarse antes del costo de incrementar el tiempo de lixiviación. [17,18]

La concentración de oxígeno disuelto depende principalmente del contenido de oxígeno de la fase gaseosa en contacto con la solución de lixiviación, temperatura y altitud sobre el nivel del mar. [3]

En la tabla 2 nos muestra el equilibrio de la concentración de oxígeno disuelto a varias temperaturas y diferentes altitudes. Esto muestra que la concentración de oxígeno alcanzable en la mayoría de las operaciones de lixiviación de oro varía desde

aproximadamente 5 mg / l a gran altura sobre el ni, en un clima cálido y hasta más de 10 mg / l a nivel del mar en condiciones frías. [3]

**Tabla 2. Equilibrio de la concentración de oxígeno disuelto(aire) en agua a varias temperaturas y altitudes.**

Temperature (°C)	Sea Level (760 mm Hg)	914 m Altitude (680 mm Hg)	1,828 m Altitude (610 mm Hg)
0	14.6	13.1	11.7
5	12.8	11.4	10.3
10	11.3	10.1	9.1
15	10.1	9.0	8.1
20	9.1	8.2	7.3
25	8.3	7.3	6.6
30	7.5	6.7	6.1
35	7.0	6.2	5.6
40	6.5	5.7	5.2
45	6.0	5.3	4.8
50	5.6	4.9	4.5
60	4.8	4.2	3.8
70	3.9	3.4	3.0
80	2.9	2.4	2.0
90	1.7	1.1	0.7
100	0	0	0

**Fuente : Cathro, K.J & D.F.A Koch (1961). [15]**

En la práctica hay 2 métodos para incrementar el oxígeno disuelto por encima del nivel del equilibrio de saturación. [3]

- Operaciones bajo presión utilizando el aire como oxidante.
- Uso de oxígeno puro, aire enriquecido con oxígeno, peróxido de hidrógeno u otra fuente de oxígeno que complemente o reemplace el aire en la fase gaseosa.

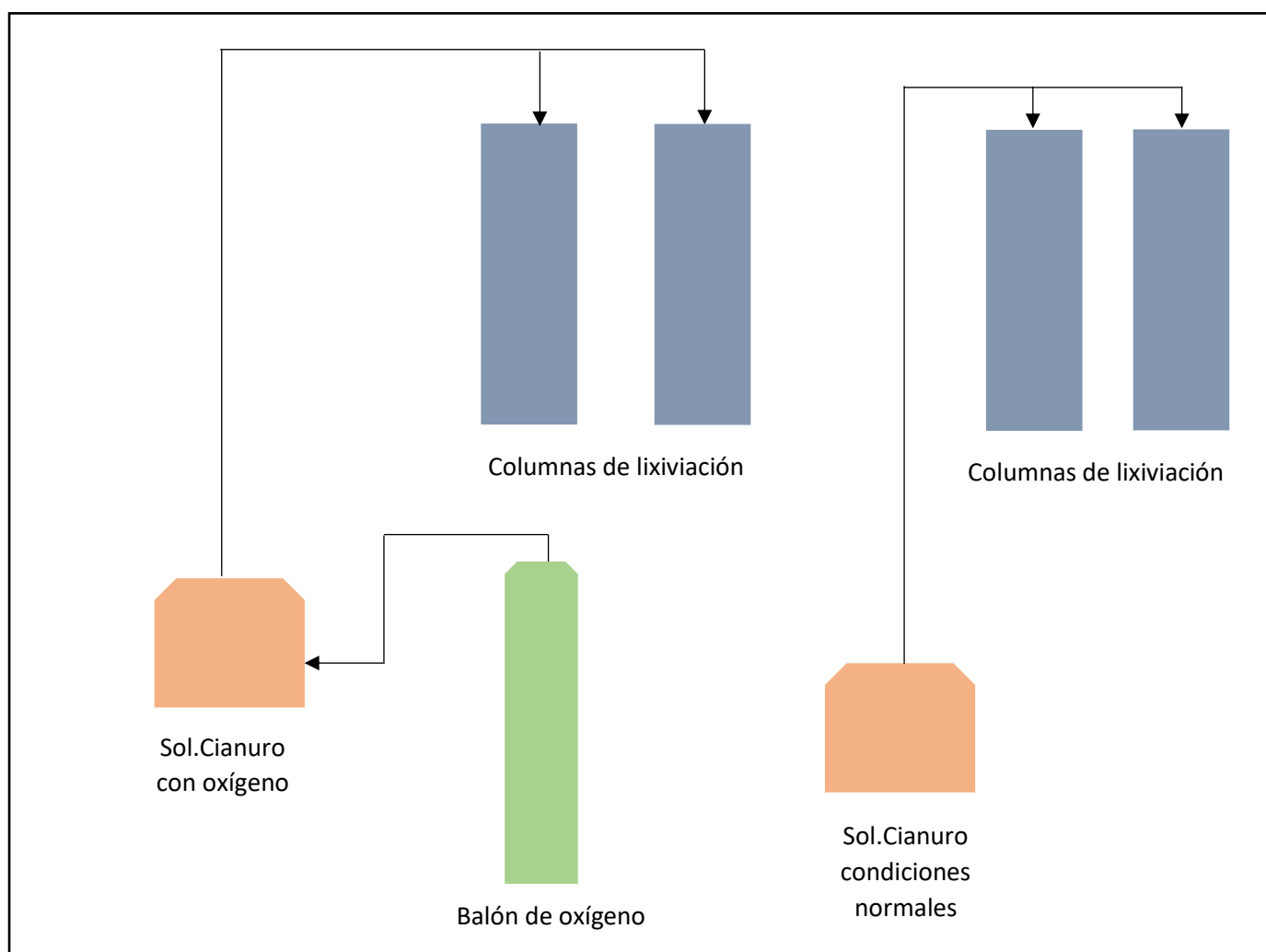
Gran número de oxidantes son propuestos para incrementar la concentración de oxígeno en soluciones alcalinas incluyendo oxidantes sólidos como los peróxidos de bario, sodio, potasio, calcio y manganeso , clorato de potasio, permanganato de potasio, bicromato de potasio y ferrocianuro de potasio [19].

## CAPÍTULO 4

### PRUEBAS METALÚRGICAS A NIVEL DE LABORATORIO

Las pruebas realizadas para el estudio de esta tesis se dividen en 2 partes, la primera parte se evalúa el comportamiento de la concentración del oxígeno en solución de cianuro para así poder determinar el tiempo óptimo y la concentración óptima. La segunda parte consiste en realizar pruebas de cianuración en columnas para mineral de diferentes leyes de oro y plata proveniente del tajo Pampa Verde y pruebas de cianuración en columnas con mineral ripio proveniente del PAD de lixiviación.

**Figura 6. Diagrama de proceso de pruebas de lixiviación**



**Fuente: Elaboración propia**

## Equipos y materiales utilizados

- Cerámicos con microporos (125  $\mu\text{m}$ )
- Medidores de presión.
- Bidones contenedores.
- Balón de oxígeno.
- Columnas para pruebas de lixiviación.
- Solución de cianuro a 70 ppm.
- Mineral de oro proveniente del Tajo Pampa Verde.
- Bombas Peristálticas.

### **4.1 Parte 1 - Pruebas de comportamiento del oxígeno en solución de cianuro**

Estas pruebas se realizaron inyectando aire y oxígeno para luego determinar si había alguna diferencia en la concentración de oxígeno en la solución y si también se podía llegar a tener la misma concentración de oxígeno utilizando aire.

#### **4.1.1 Pruebas de inyección de aire**

En estas pruebas se inyectó aire mediante cerámicos con microporos, la inyección de aire se realizó de manera continua mientras duraba la prueba. Las tablas número 3 , 4 y 5 muestran la variación de la concentración de oxígeno y fuerza de cianuro a 40, 50 y 100 psi de inyección de aire a una solución de cianuro a 70 ppm , esta concentración de cianuro se determino debido a que es el valor operativo al cual el PAD es lixiviado.

**Prueba # 1**

Fuerza de cianuro en solución: 70 ppm

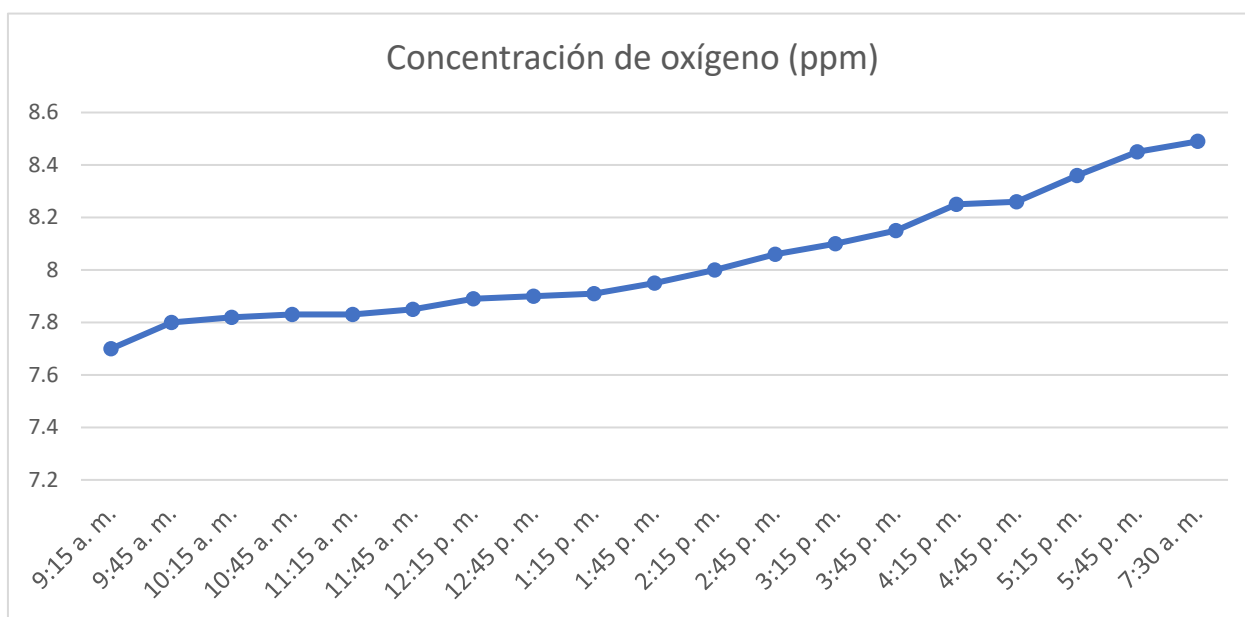
Volumen de solución: 20 litros

Presión de inyección de aire: 40 psi

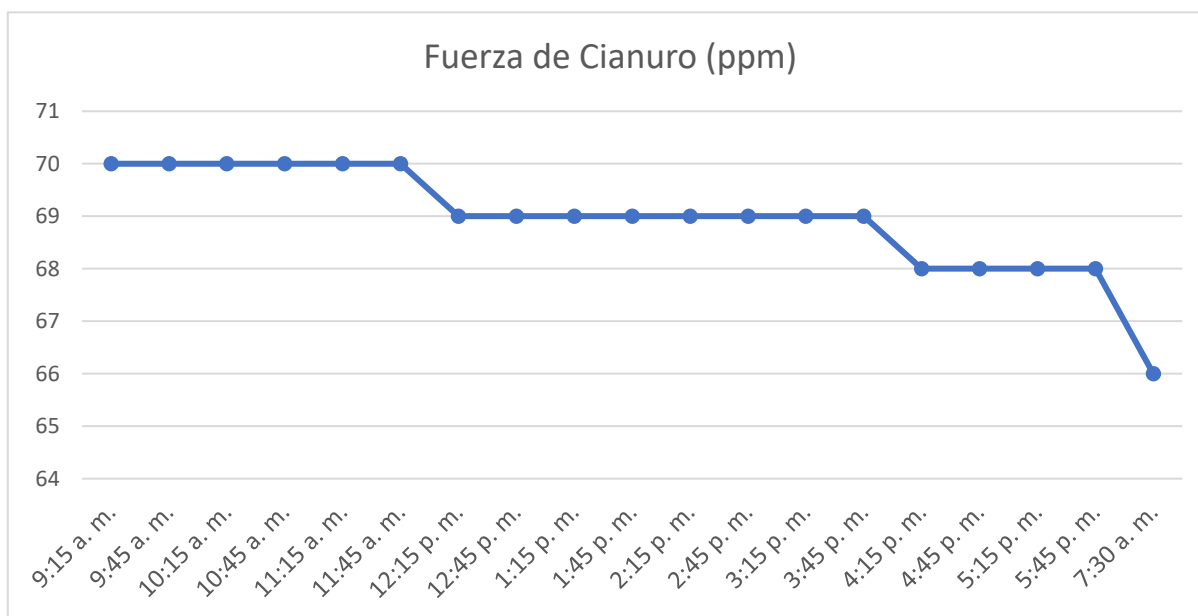
**Tabla 3: Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro**

Hora de medición	pH	Fuerza de cianuro (ppm)	Concentración de oxígeno (ppm)
9:15 a. m.	10.15	70	7.70
9:45 a. m.	10.23	70	7.80
10:15 a. m.	10.15	70	7.82
10:45 a. m.	10.13	70	7.83
11:15 a. m.	10.17	70	7.83
11:45 a. m.	10.14	70	7.85
12:15 p. m.	10.19	69	7.89
12:45 p. m.	10.14	69	7.90
1:15 p. m.	10.15	69	7.91
1:45 p. m.	10.13	69	7.95
2:15 p. m.	10.14	69	8.00
2:45 p. m.	10.12	69	8.06
3:15 p. m.	10.12	69	8.10
3:45 p. m.	10.12	69	8.15
4:15 p. m.	10.16	68	8.25
4:45 p. m.	10.16	68	8.26
5:15 p. m.	10.11	68	8.36
5:45 p. m.	10.12	68	8.45
7:30 a. m.	10.23	66	8.49

**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 7. Concentración de oxígeno vs tiempo. – Prueba con aire 1****Fuente: Elaboración propia**

En la figura 7 se observa que la concentración de oxígeno solo llego hasta 8.5 ppm después de una inyección continua de aire.

**Figura 8. Fuerza de cianuro vs tiempo – Prueba con aire 1****Fuente: Elaboración propia**

En la figura 8 se observa que la fuerza de cianuro disminuyo de 70 ppm a 65 ppm finalizada la inyección de aire.

**Prueba # 2**

Fuerza de cianuro en solución: 70 ppm

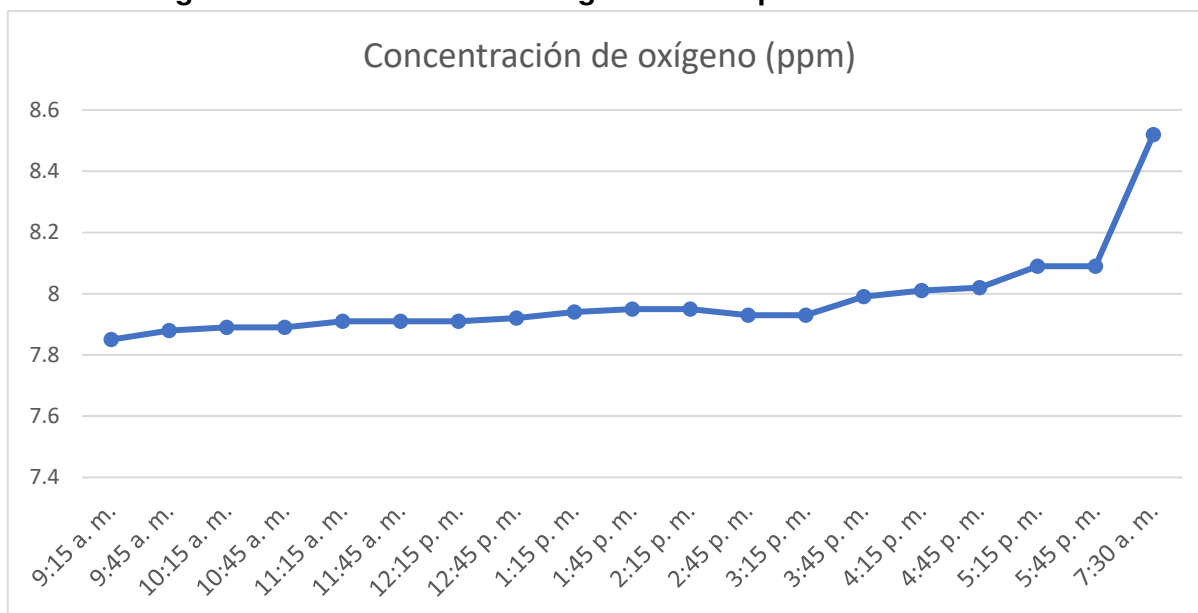
Volumen de solución: 20 litros

Presión de inyección de aire: 50 psi

**Tabla 4: Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro Fuente: Elaboración propia**

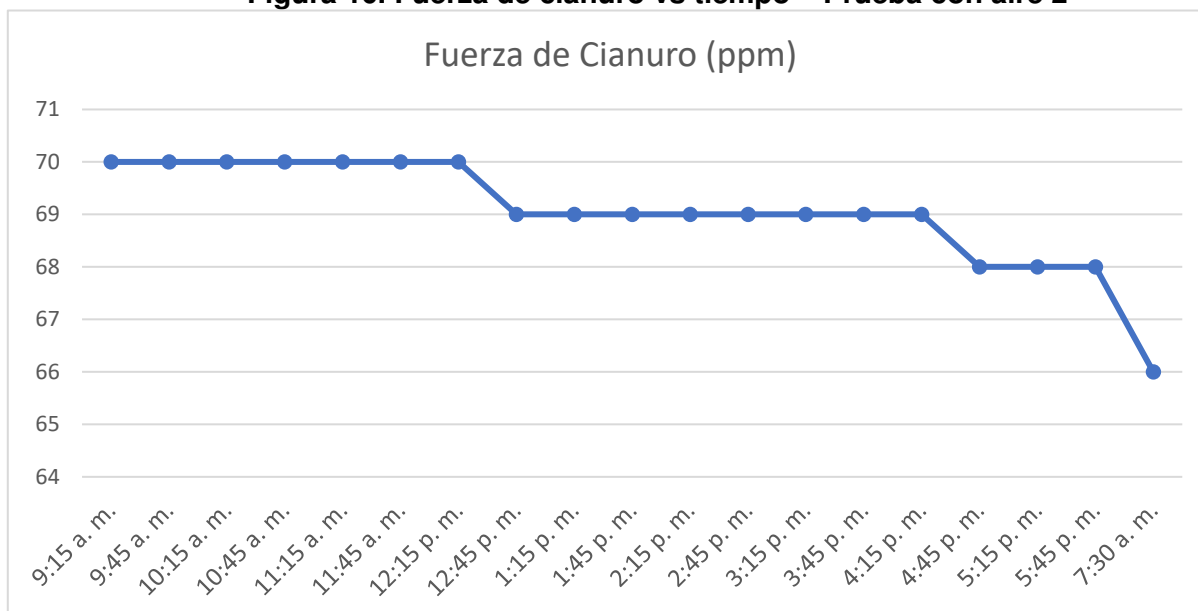
Hora de medición	pH	Concentración de oxígeno (ppm)	Fuerza de Cianuro (ppm)
9:15 a. m.	10.21	7.85	70
9:45 a. m.	10.13	7.88	70
10:15 a. m.	10.24	7.89	70
10:45 a. m.	10.22	7.89	70
11:15 a. m.	10.23	7.91	70
11:45 a. m.	10.22	7.91	70
12:15 p. m.	10.20	7.91	70
12:45 p. m.	10.24	7.92	69
1:15 p. m.	10.18	7.94	69
1:45 p. m.	10.16	7.95	69
2:15 p. m.	10.15	7.95	69
2:45 p. m.	10.18	7.93	69
3:15 p. m.	10.17	7.93	69
3:45 p. m.	10.19	7.99	69
4:15 p. m.	10.21	8.01	69
4:45 p. m.	10.18	8.02	68
5:15 p. m.	10.19	8.09	68
5:45 p. m.	10.20	8.09	68
7:30 a. m.	10.16	8.52	66

**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 9. Concentración de oxígeno vs tiempo – Prueba con aire 2**

**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 9 se observa que la concentración de oxígeno solo llego hasta 8.52 ppm después de una inyección continua de aire.

**Figura 10. Fuerza de cianuro vs tiempo – Prueba con aire 2**

**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 10 se observa que la fuerza de cianuro disminuyo de 70 ppm a 66 ppm finalizada la inyección de aire.



**Prueba # 3**

Fuerza de cianuro en solución: 70 ppm

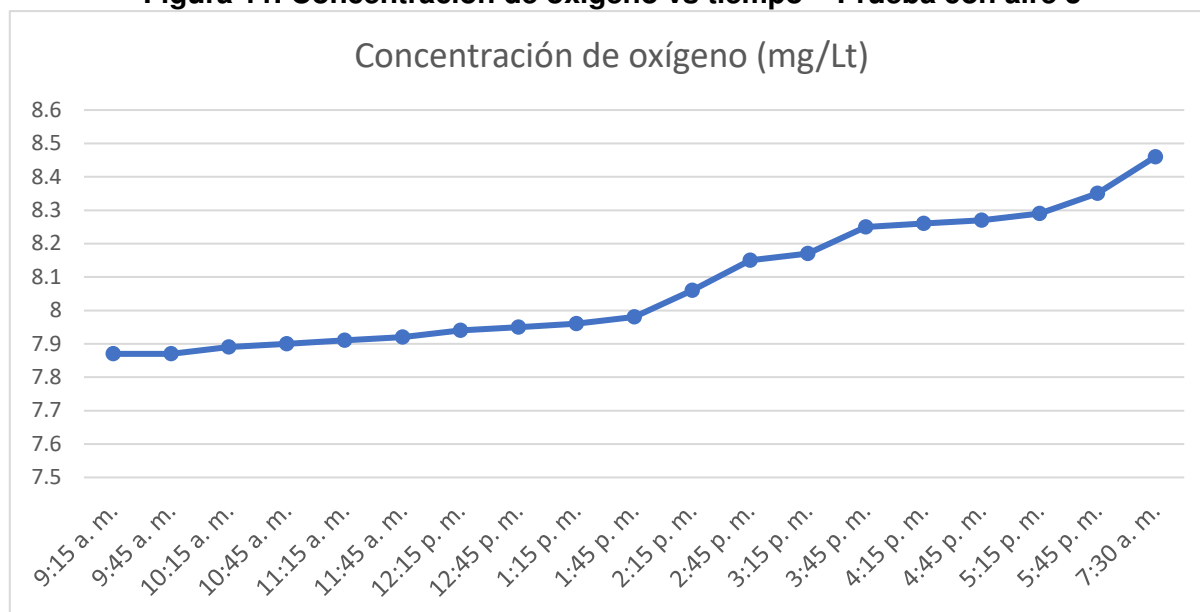
Volumen de solución: 20 litros

Presión de inyección de aire: 100 psi

**Tabla 5: Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro. Fuente: Elaboración propia**

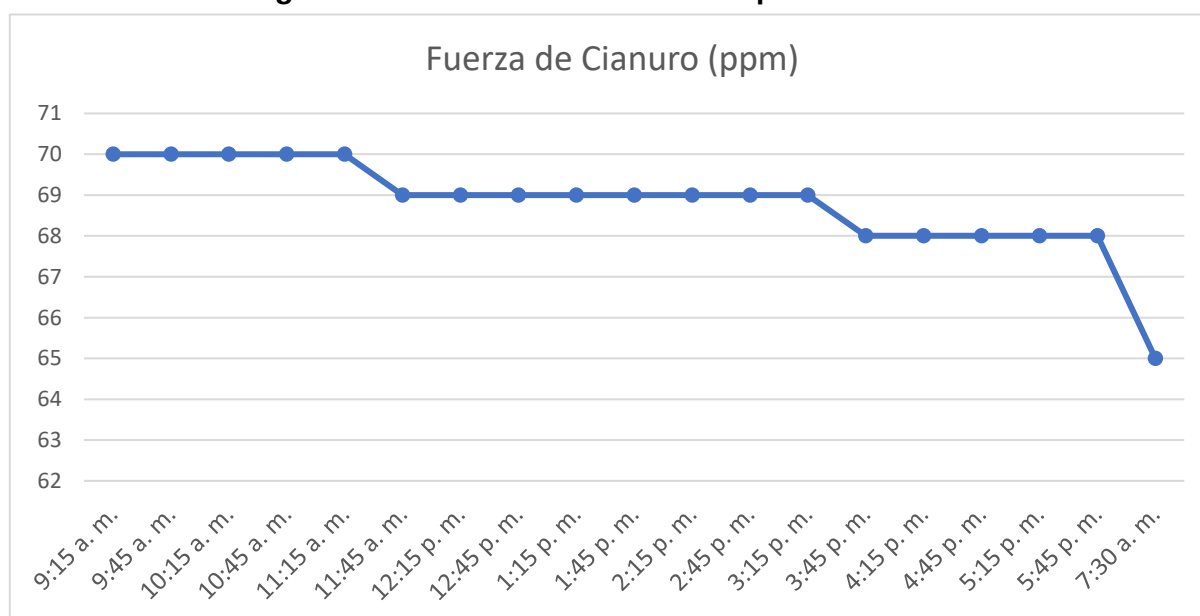
Hora de medición	pH	Concentración de oxígeno (mg/Lt)	Fuerza de Cianuro (ppm)
9:15 a.m.	10.65	7.87	70
9:45 a.m.	10.66	7.87	70
10:15 a.m.	10.35	7.89	70
10:45 a.m.	11.15	7.90	70
11:15 a.m.	11.18	7.91	70
11:45 a.m.	10.45	7.92	69
12:15 p.m.	10.31	7.94	69
12:45 p.m.	10.28	7.95	69
1:15 p.m.	10.51	7.96	69
1:45 p.m.	10.41	7.98	69
2:15 p.m.	10.51	8.06	69
2:45 p.m.	10.25	8.15	69
3:15 p.m.	10.68	8.17	69
3:45 p.m.	11.19	8.25	68
4:15 p.m.	11.21	8.26	68
4:45 p.m.	10.85	8.27	68
5:15 p.m.	10.65	8.29	68
5:45 p.m.	10.66	8.35	68
7:30 a.m.	10.43	8.46	65

**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 11. Concentración de oxígeno vs tiempo – Prueba con aire 3**

**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 11 se observa que la concentración de oxígeno solo llego hasta 8.46 ppm después de una inyección continua de aire

**Figura 12. Fuerza de cianuro vs tiempo – Prueba con aire 3**

**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 12 se observa que la fuerza de cianuro disminuyo de 70 ppm a 65 ppm finalizada la inyección de aire.

#### 4.1.2 Pruebas de inyección de oxígeno

La inyección de oxígeno se realizó solamente por periodos de 3 y 5 minutos según la concentración del oxígeno en solución. Las tablas siguientes muestran las pruebas que se realizaron a las presiones de 50, 100 y 150 psi de inyección de oxígeno a una solución de cianuro a 70 ppm.

##### **Prueba # 1**

Fuerza de cianuro en solución: 70 ppm

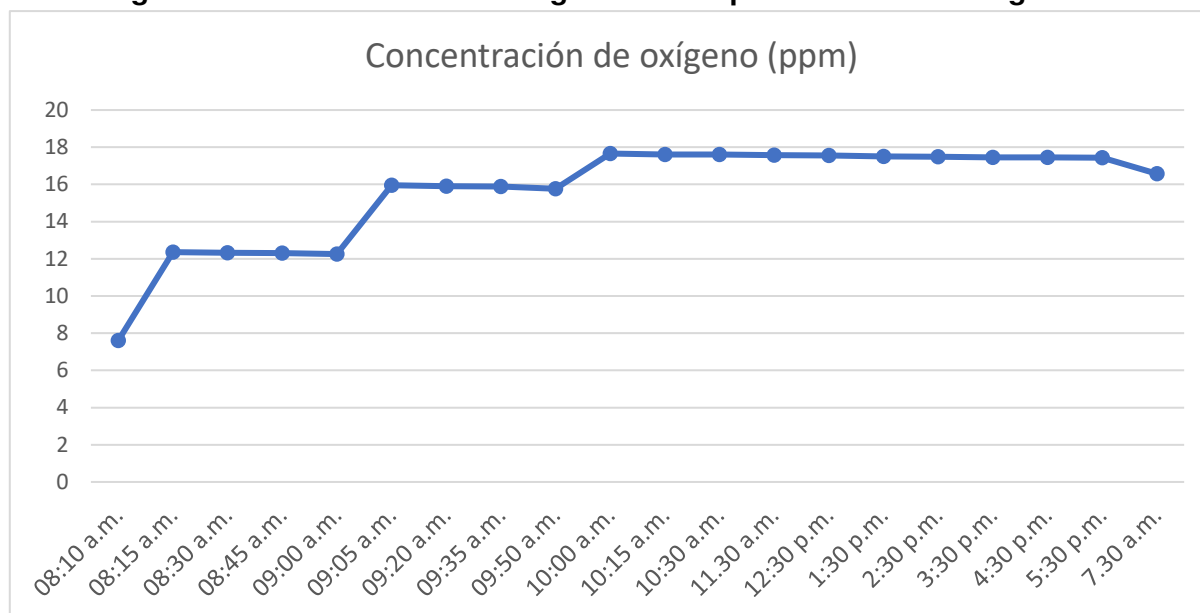
Volumen de solución: 20 litros

Presión de inyección de oxígeno: 50 psi

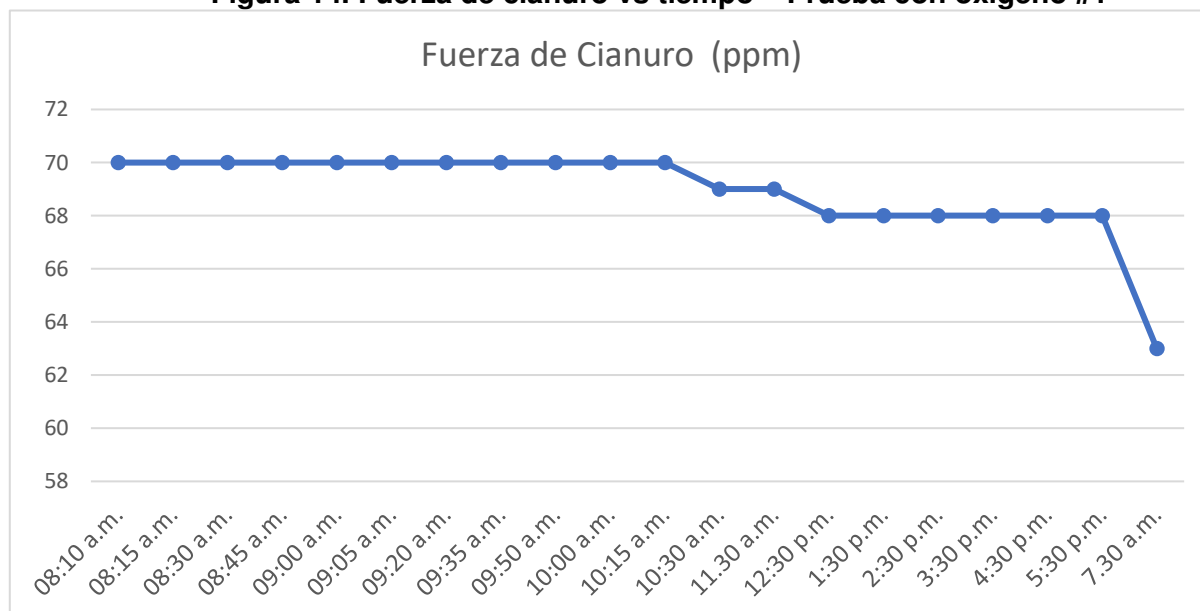
**Tabla 6: Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro.**

Hora de medición	pH	Concentración de oxígeno (mg/Lt)	Fuerza de Cianuro (ppm)
08:10 a.m.	10.49	7.60	70
08:15 a.m.	10.66	12.35	70
08:30 a.m.	10.62	12.33	70
08:45 a.m.	10.68	12.31	70
09:00 a.m.	10.66	12.25	70
09:05 a.m.	10.69	15.95	70
09:20 a.m.	10.72	15.91	70
09:35 a.m.	10.75	15.88	70
09:50 a.m.	10.71	15.76	70
10:00 a.m.	10.74	17.66	70
10:15 a.m.	10.75	17.61	70
10:30 a.m.	10.66	17.61	69
11:30 a.m.	10.65	17.57	69
12:30 p.m.	10.67	17.55	68
1:30 p.m.	10.73	17.51	68
2:30 p.m.	10.63	17.48	68
3:30 p.m.	10.63	17.46	68
4:30 p.m.	10.67	17.45	68
5:30 p.m.	10.66	17.44	68
7:30 a.m.	10.66	16.57	63

**Fuente: Elaboración propia.**

**Figura 13. Concentración de oxígeno vs tiempo – Prueba con oxígeno #1****Fuente: Elaboración propia**

En la figura 13 se observa que la concentración de oxígeno llego hasta 16.57 ppm después de inyectar oxígeno 3 veces

**Figura 14. Fuerza de cianuro vs tiempo – Prueba con oxígeno #1****Fuente: Elaboración propia**

En la figura 14 se observa que la fuerza de cianuro disminuyo de 70 ppm a 63 ppm.

**Prueba # 2**

Fuerza de cianuro en solución: 70 ppm

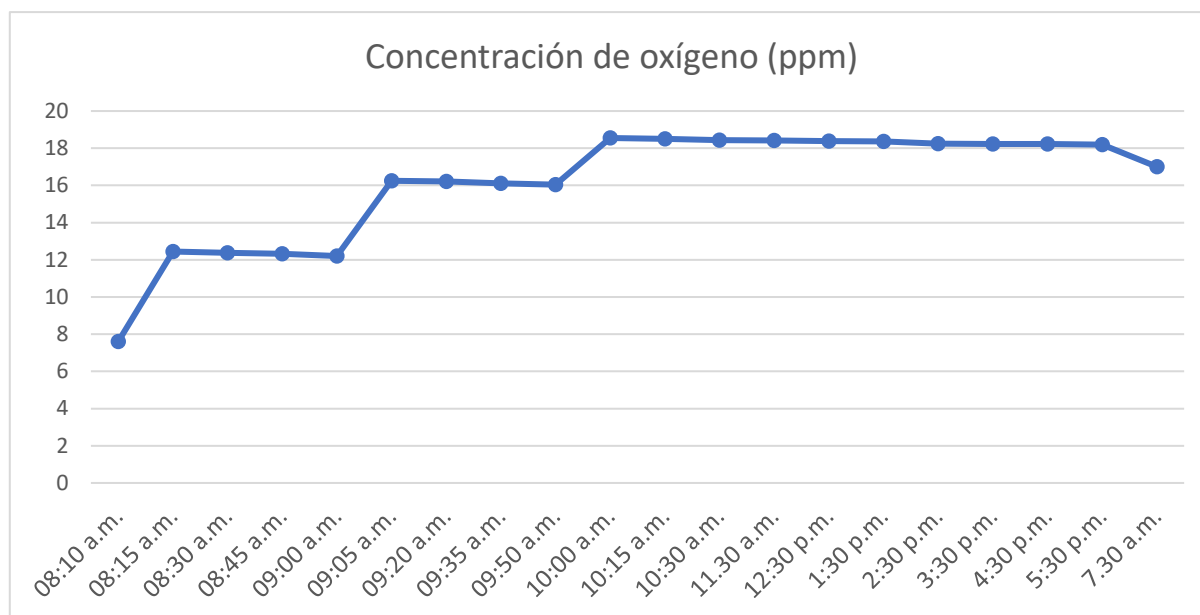
Volumen de solución: 20 litros

Presión de inyección de oxígeno: 50 psi

**Tabla 7 : Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro.**

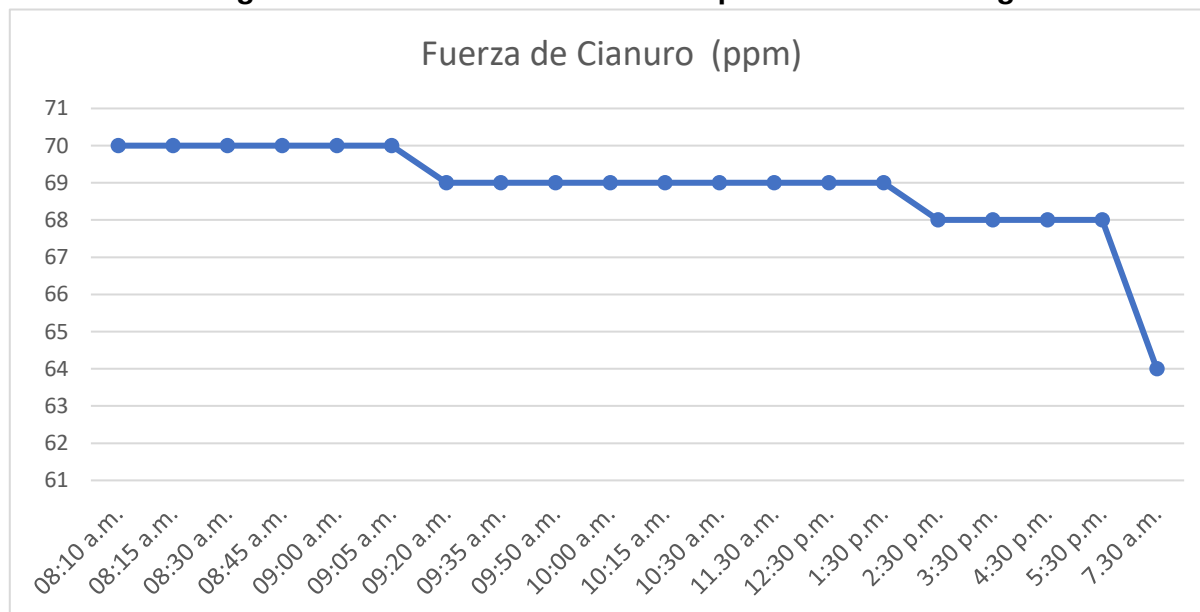
Hora de medición	pH	Concentración de oxígeno (mg/Lt)	Fuerza de Cianuro (ppm)
08:10 a.m.	10.65	7.60	70
08:15 a.m.	10.46	12.45	70
08:30 a.m.	10.25	12.38	70
08:45 a.m.	10.36	12.33	70
09:00 a.m.	10.69	12.21	70
09:05 a.m.	10.63	16.25	70
09:20 a.m.	10.39	16.21	69
09:35 a.m.	10.45	16.11	69
09:50 a.m.	10.52	16.05	69
10:00 a.m.	10.61	18.55	69
10:15 a.m.	10.51	18.51	69
10:30 a.m.	10.55	18.44	69
11:30 a.m.	10.25	18.41	69
12:30 p.m.	10.33	18.39	69
1:30 p.m.	10.39	18.37	69
2:30 p.m.	10.41	18.25	68
3:30 p.m.	10.43	18.22	68
4:30 p.m.	10.52	18.22	68
5:30 p.m.	10.84	18.19	68
7:30 a.m.	10.73	17.00	64

**Fuente: Elaboración propia.**

**Figura 15. Concentración de oxígeno vs tiempo – Prueba con oxígeno #2**

**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 15 se observa que la concentración de oxígeno llego hasta 17 ppm después de una inyectar oxígeno 3 veces.

**Figura 16. Fuerza de cianuro vs tiempo – Prueba con oxígeno #2**

**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 16 se observa que la fuerza de cianuro disminuyo de 70 ppm a 64 ppm.

**Prueba # 3**

Fuerza de cianuro en solución: 70 ppm

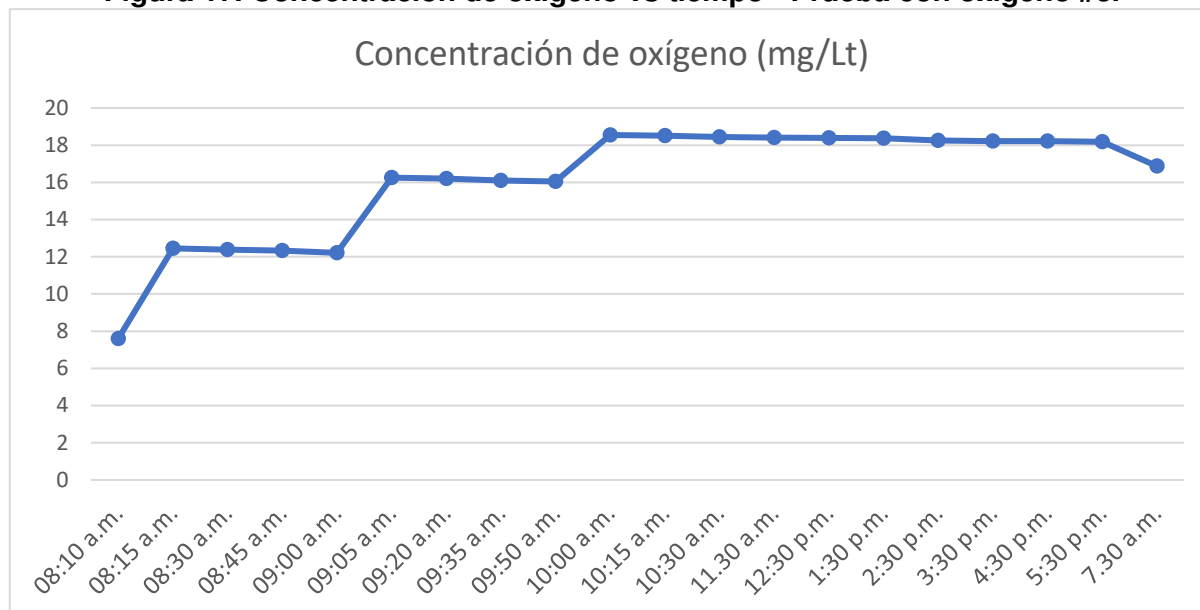
Volumen de solución: 20 litros

Presión de inyección de oxígeno: 100 psi

**Tabla 8: Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro.**

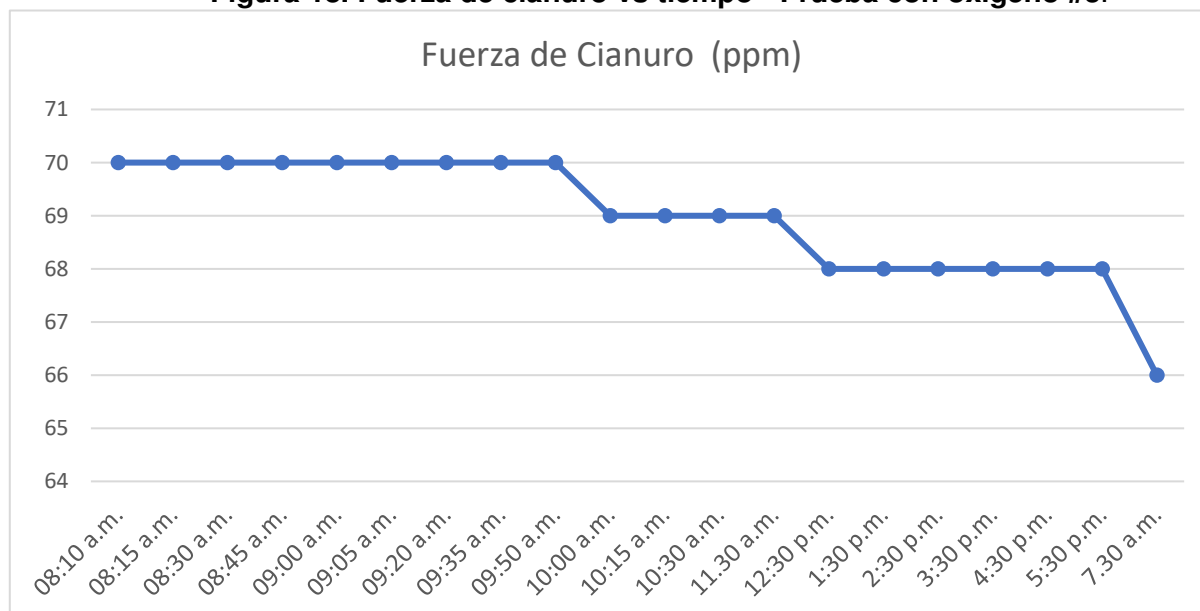
Hora de medición	pH	Concentración de oxígeno (mg/Lt)	Fuerza de Cianuro (ppm)
08:10 a.m.	10.36	7.60	70
08:15 a.m.	10.41	12.45	70
08:30 a.m.	10.48	12.38	70
08:45 a.m.	10.19	12.33	70
09:00 a.m.	10.24	12.21	70
09:05 a.m.	10.74	16.25	70
09:20 a.m.	10.64	16.21	70
09:35 a.m.	10.35	16.11	70
09:50 a.m.	10.49	16.05	70
10:00 a.m.	10.65	18.55	69
10:15 a.m.	10.39	18.51	69
10:30 a.m.	10.41	18.44	69
11:30 a.m.	10.45	18.41	69
12:30 p.m.	10.52	18.39	68
1:30 p.m.	10.64	18.37	68
2:30 p.m.	10.71	18.25	68
3:30 p.m.	10.37	18.22	68
4:30 p.m.	10.61	18.22	68
5:30 p.m.	10.55	18.19	68
7:30 a.m.	10.59	16.88	66

**Fuente: Elaboración propia.**

**Figura 17. Concentración de oxígeno vs tiempo - Prueba con oxígeno #3.**

**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 17 se observa que la concentración de oxígeno llego hasta 16.88 ppm después de una inyectar oxígeno 3 veces.

**Figura 18. Fuerza de cianuro vs tiempo - Prueba con oxígeno #3.**

**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 18 se observa que la fuerza de cianuro disminuyo de 70 ppm a 66 ppm.



**Prueba # 4**

Fuerza de cianuro en solución: 70 ppm

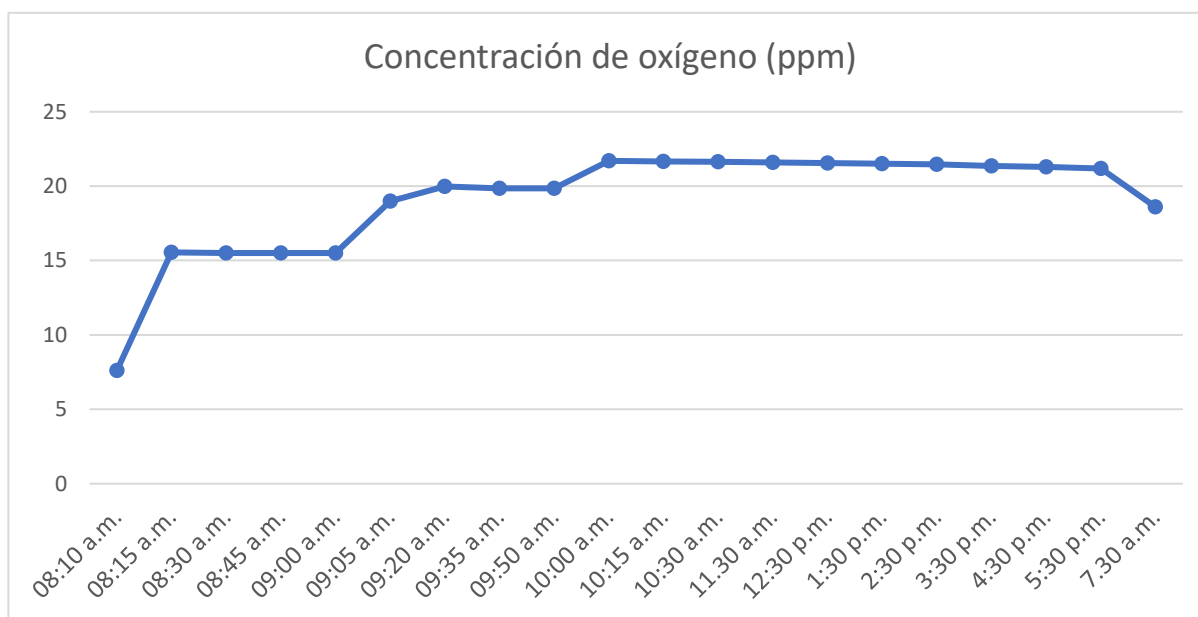
Volumen de solución: 20 litros

Presión de inyección de oxígeno: 100 psi

**Tabla 9: Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro.**

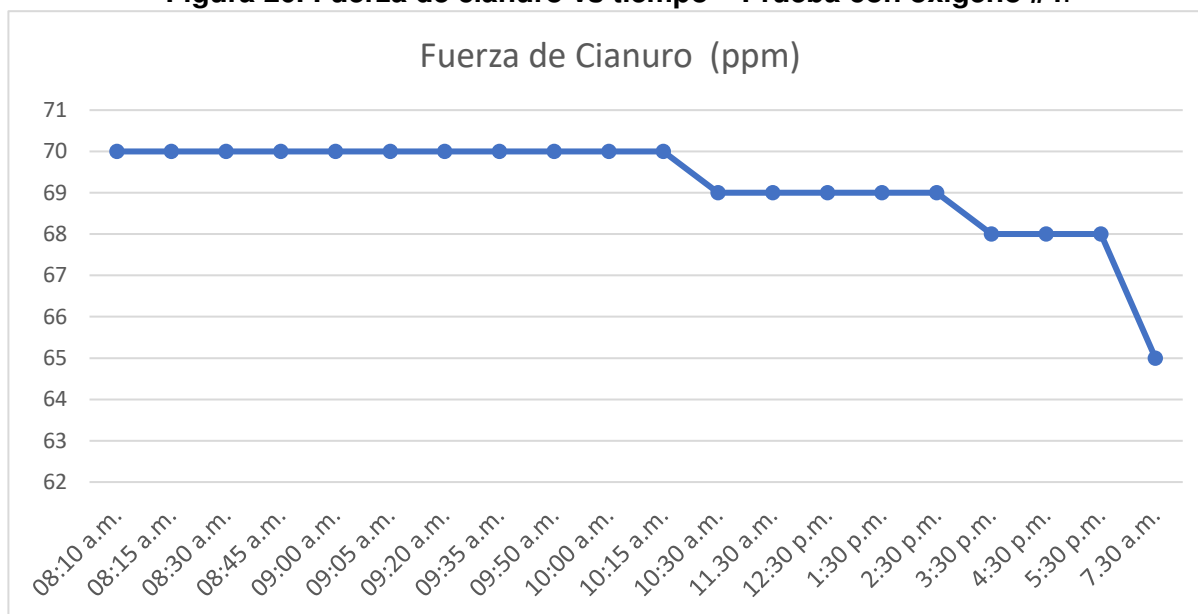
Hora de medición	pH	Concentración de oxígeno (mg/Lt)	Fuerza de Cianuro (ppm)
08:10 a.m.	10.42	7.60	70
08:15 a.m.	10.51	15.55	70
08:30 a.m.	10.17	15.51	70
08:45 a.m.	10.64	15.51	70
09:00 a.m.	10.52	15.50	70
09:05 a.m.	10.84	19.00	70
09:20 a.m.	10.49	19.98	70
09:35 a.m.	10.65	19.85	70
09:50 a.m.	10.28	19.85	70
10:00 a.m.	10.65	21.70	70
10:15 a.m.	10.45	21.66	70
10:30 a.m.	10.23	21.64	69
11:30 a.m.	10.66	21.60	69
12:30 p.m.	10.48	21.55	69
1:30 p.m.	10.81	21.51	69
2:30 p.m.	10.52	21.47	69
3:30 p.m.	10.49	21.36	68
4:30 p.m.	10.52	21.29	68
5:30 p.m.	10.15	21.18	68
7:30 a.m.	10.51	18.60	65

**Fuente: Elaboración propia.**

**Figura 19. Concentración de oxígeno vs tiempo -Prueba con oxígeno #4.**

**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 19 se observa que la concentración de oxígeno llego hasta 18.6 ppm después de una inyectar oxígeno 3 veces.

**Figura 20. Fuerza de cianuro vs tiempo – Prueba con oxígeno #4.**

**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 20 se observa que la fuerza de cianuro disminuyo de 70 ppm a 65 ppm.

**Prueba # 5**

Fuerza de cianuro en solución: 70 ppm

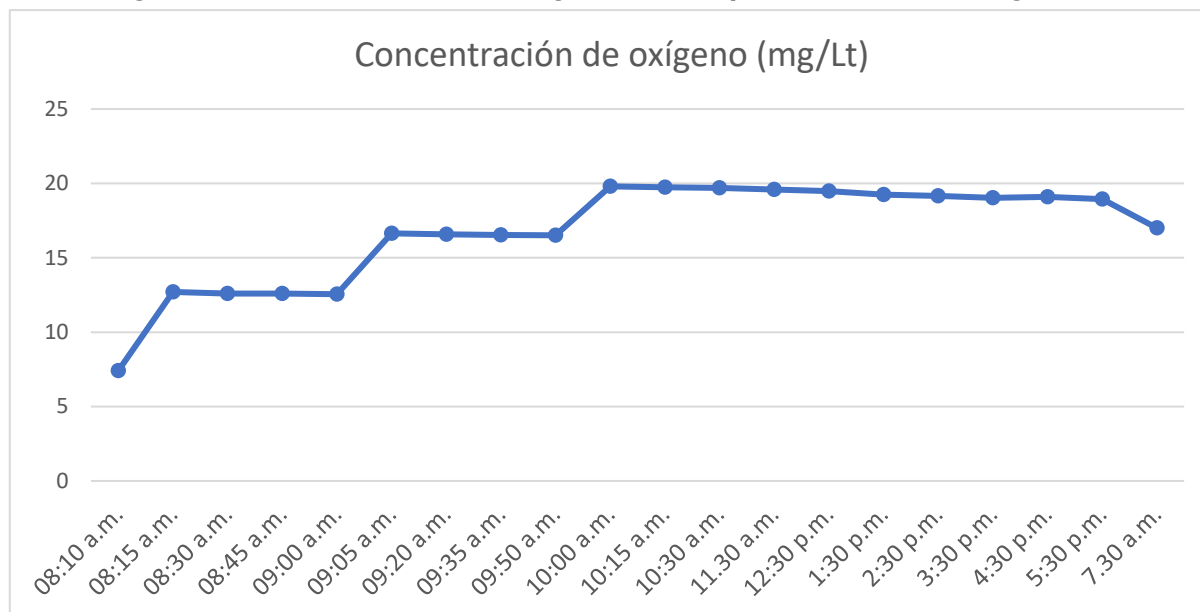
Volumen de solución: 20 litros

Presión de inyección de oxígeno: 150 psi

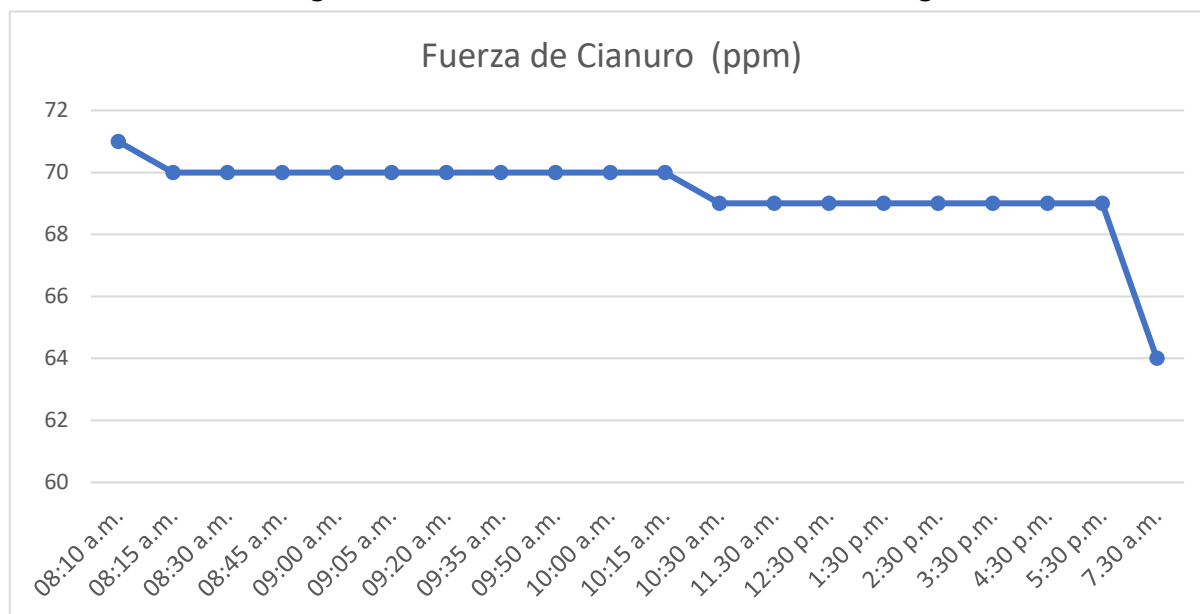
**Tabla 10: Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro.**

Hora de medición	pH	Concentración de oxígeno (mg/Lt)	Fuerza de Cianuro (ppm)
08:10 a.m.	10.51	7.40	71
08:15 a.m.	10.47	12.71	70
08:30 a.m.	10.87	12.60	70
08:45 a.m.	10.56	12.59	70
09:00 a.m.	10.52	12.55	70
09:05 a.m.	10.15	16.65	70
09:20 a.m.	10.73	16.58	70
09:35 a.m.	10.95	16.54	70
09:50 a.m.	10.42	16.52	70
10:00 a.m.	10.37	19.80	70
10:15 a.m.	10.82	19.74	70
10:30 a.m.	10.64	19.69	69
11:30 a.m.	10.71	19.58	69
12:30 p.m.	10.43	19.48	69
1:30 p.m.	10.62	19.25	69
2:30 p.m.	10.28	19.17	69
3:30 p.m.	10.71	19.03	69
4:30 p.m.	10.62	19.09	69
5:30 p.m.	10.43	18.95	69
7:30 a.m.	10.41	17.01	64

**Fuente: Elaboración propia.**

**Figura 21. Concentración de oxígeno vs tiempo – Prueba con oxígeno #5****Fuente: Elaboración propia**

En la figura 21 se observa que la concentración de oxígeno llego hasta 17.01 ppm después de una inyectar oxígeno 3 veces.

**Figura 22. Fuerza de cianuro - Prueba con oxígeno #5.****Fuente: Elaboración propia**

En la figura 22 se observa que la fuerza de cianuro disminuyo de 71 ppm a 64 ppm.

**Prueba # 6**

Fuerza de cianuro en solución: 70 ppm

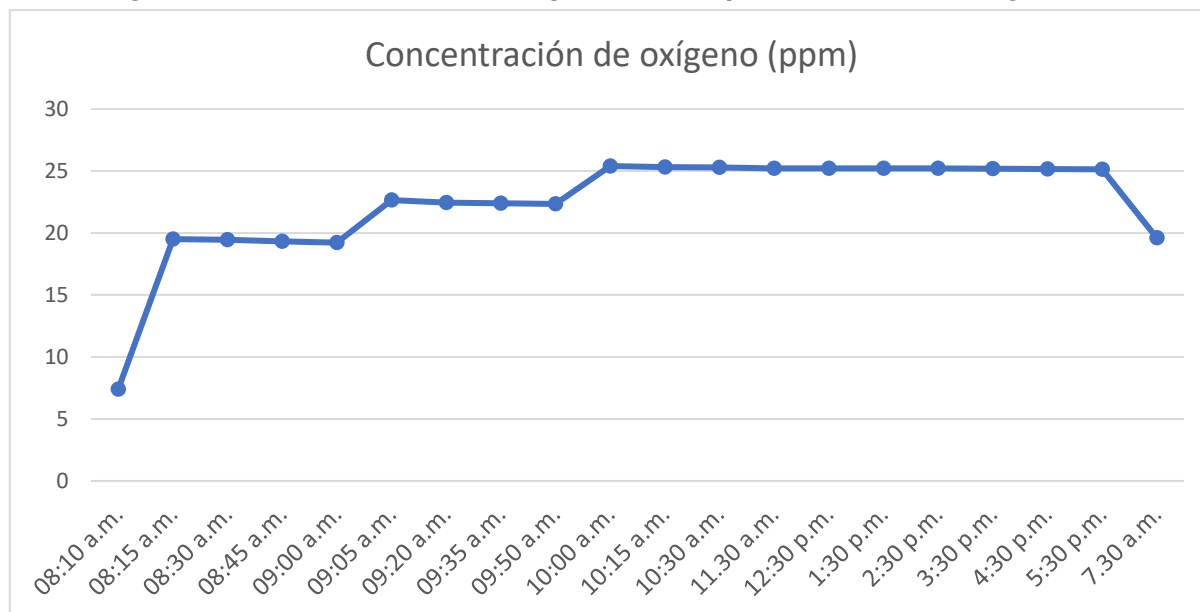
Volumen de solución: 20 litros

Presión de inyección de oxígeno: 150 psi

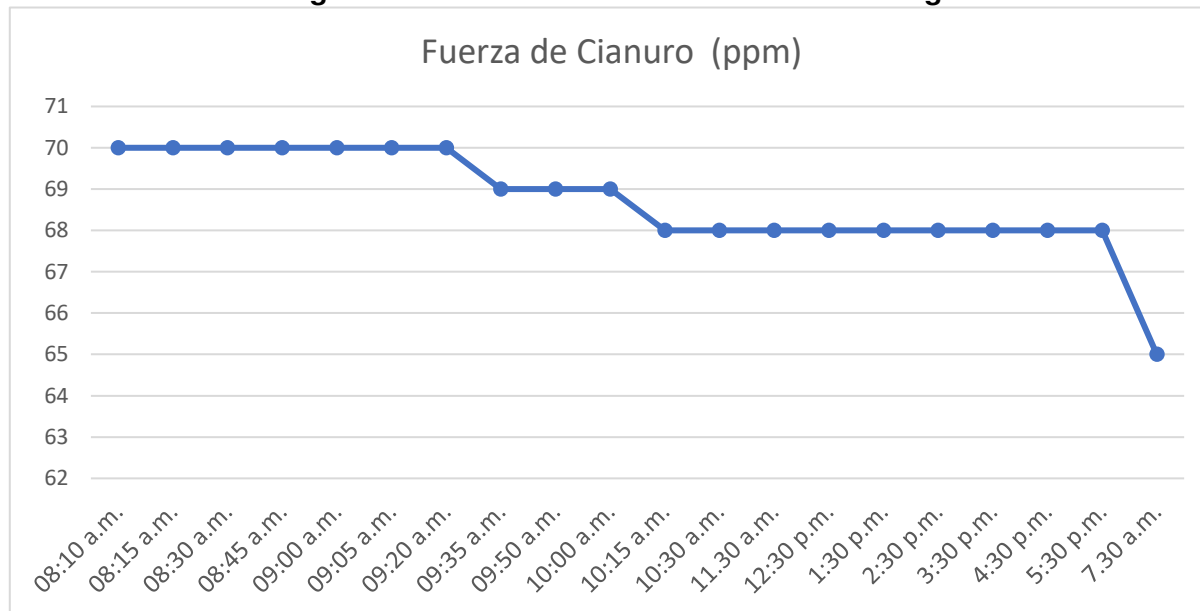
**Tabla 11: Valores de pH, concentración de oxígeno y fuerza de cianuro.**

Hora de medición	pH	Concentración de oxígeno (mg/Lt)	Fuerza de Cianuro (ppm)
08:10 a.m.	10.52	7.40	70
08:15 a.m.	10.48	19.50	70
08:30 a.m.	10.65	19.45	70
08:45 a.m.	10.15	19.33	70
09:00 a.m.	10.54	19.21	70
09:05 a.m.	10.96	22.65	70
09:20 a.m.	10.62	22.44	70
09:35 a.m.	10.47	22.41	69
09:50 a.m.	10.74	22.35	69
10:00 a.m.	10.62	25.40	69
10:15 a.m.	10.84	25.31	68
10:30 a.m.	10.63	25.28	68
11:30 a.m.	10.45	25.22	68
12:30 p.m.	10.49	25.22	68
1:30 p.m.	10.72	25.20	68
2:30 p.m.	10.52	25.20	68
3:30 p.m.	10.66	25.19	68
4:30 p.m.	10.64	25.15	68
5:30 p.m.	10.25	25.14	68
7:30 a.m.	10.66	19.60	65

**Fuente: Elaboración propia.**

**Figura 23. Concentración de oxígeno vs tiempo – Prueba con oxígeno #6.****Fuente: Elaboración propia**

En la figura 23 se observa que la concentración de oxígeno llego hasta 19.6 ppm después de una inyectar oxígeno 3 veces.

**Figura 24. Fuerza de cianuro – Prueba con oxígeno #6****Fuente: Elaboración propia**

En la figura 24 se observa que la fuerza de cianuro disminuyo de 70 ppm a 65 ppm.

## 4.2 Parte 2 - Pruebas de lixiviación con solución oxigenada

En estas pruebas según los datos obtenidos en las primeras pruebas se determinó un tiempo de oxigenación de 5 minutos para 20 litros de solución de riego, además de que se tuvo que cambiar la solución de riego 2 veces por día para mantener regularmente las condiciones de concentración de oxígeno y concentración de cianuro en la solución de riego. Las pruebas se realizaron con mineral proveniente del Tajo Pampa Verde y mineral ripio proveniente del PAD en columnas de 30 y 25 kilogramos y regadas a un ratio de 12 L/h.m<sup>2</sup>

### Pruebas en columna # 1

Se realizó una comparación del efecto del oxígeno en mineral fresco para las columnas PC 262 y PC 263 , donde la columna PC 262 fue regada a condiciones normales y la PC 263 fue regada con solución de cianuro oxigenada.

La tabla 12 muestra la distribución granulométrica de la columna de 25 kilogramos para las mallas de 1 pulg, ½ pulgada y 10m. También muestra las leyes el contenido metálico por malla y total.

**Tabla 12. Datos de cabeza ensayada para el mineral 100 % - 1 “de las PC 262 y PC 263.**

Mallas (pulg)	PESO SECO (Kg)	PESO SECO DISTRIB. (%)	Au			Ag		
			Ley	Contenido metálico	Distribución	Ley	Contenido metálico	Distribución
			[g/t]	[mg]	[%]	[g/t]	[mg]	[%]
- 1"	10.20	40.80	0.321	3.3	21.9	2.55	26.0	33.9
- 1/2"	8.31	33.23	0.404	3.4	22.5	3.01	25.0	32.7
- 10m	6.49	25.97	1.277	8.3	55.6	3.93	25.5	33.4
TOTAL	25.00	100.00	0.597	14.9	100.0	3.06	76.5	100.0

**Fuente: Elaboración propia**

Los datos mostrados en la tabla 13 muestran el balance para el oro y plata, cantidad de reactivo utilizado, ratio S/M, tiempo de regado y el ratio de riego promedio para ambas columnas.

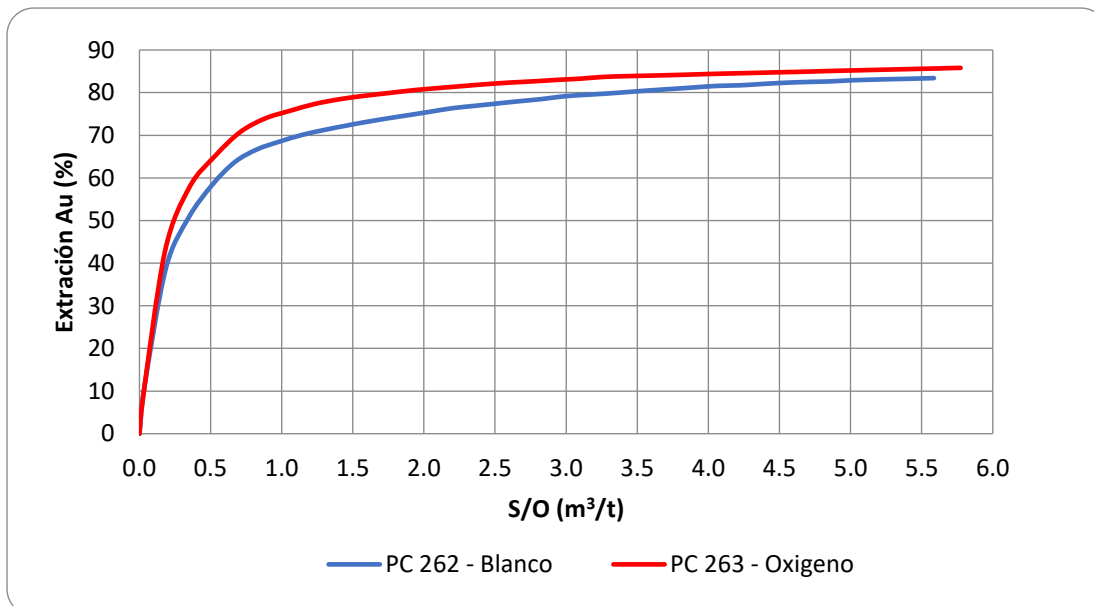
**Tabla 13. Balance de cabeza calculada para PC 262 y PC 263.**

Muestra	Balance de Oro			Balance de Plata			Reactivos, kg/t		s/m m³/t	Tiempo (d)	Ratio de Riego L/h*m²
	*Cabeza	Cola	Ext.	*Cabeza	Cola	Ext.	NaCN	Cal			
	g/t	g/t	%	g/t	g/t	%					
PC 262 – Blanco	0.604	0.10	83.4	3.18	1.6	48.6	0.168	0.64	5.6	36	11.7
PC 263 – Oxígeno	0.629	0.09	85.8	3.20	1.8	43.4	0.173	0.64	5.8	36	12.1

**Fuente: Elaboración propia**

Se graficó la extracción para la cabeza calculada versus la ratio de riego y tiempo de riego en días en comparación con la extracción de oro y plata para la cabeza calculada.

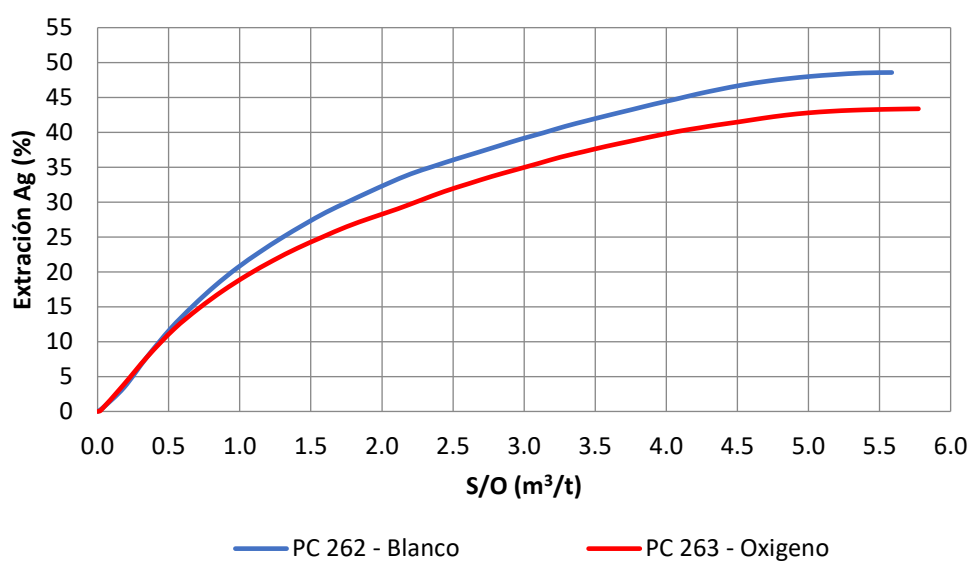
**Figura 25. Extracción de oro vs ratio de riego para PC 262 y PC 263.**



**Fuente : Elaboración propia**

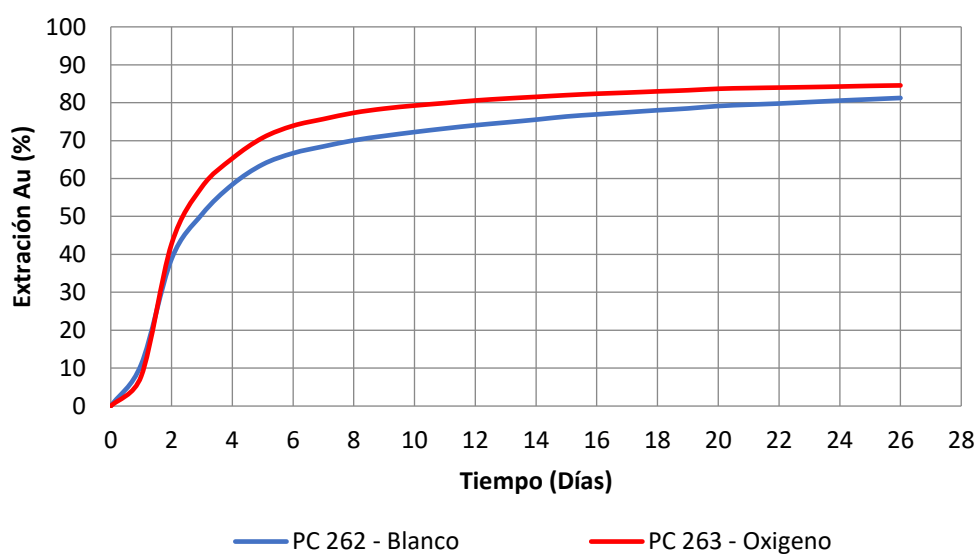


**Figura 26. Extracción de plata vs ratio de riego para PC 262 y PC 263.**

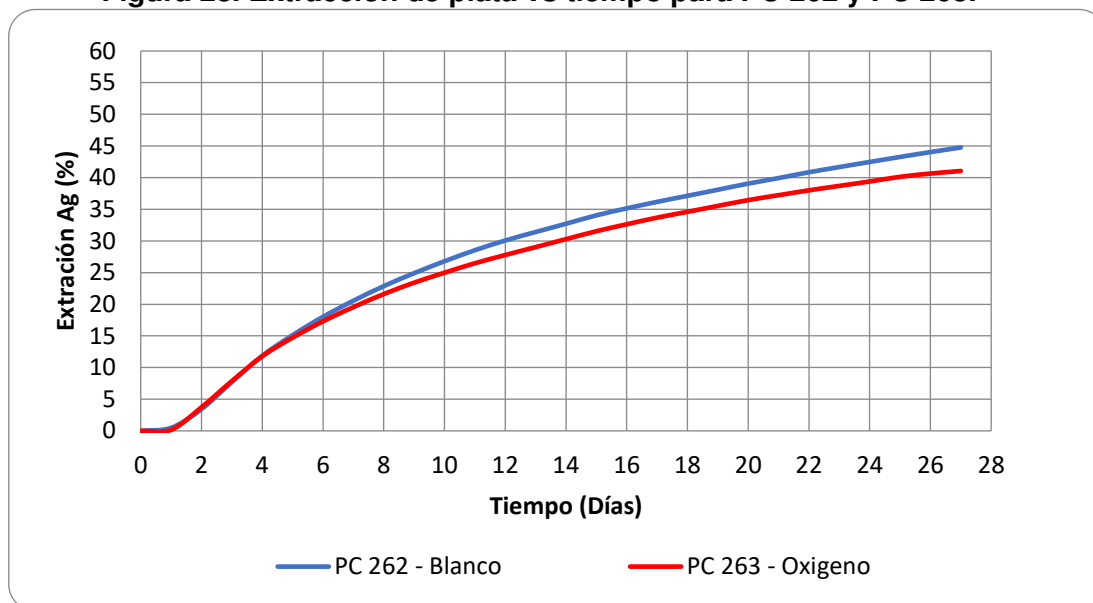


**Fuente: Elaboración propia.**

**Figura 27. Extracción de oro vs tiempo para PC 262 y PC 263.**



**Fuente : Elaboración propia.**

**Figura 28. Extracción de plata vs tiempo para PC 262 y PC 263.**

**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 25 se puede observar una mayor extracción de oro para las columnas regadas con solución oxigenada, sin embargo, en la figura 26 no ocurre la misma mejora en la lixiviación para la plata.

## Pruebas en columna # 2

Se realizó una comparación del efecto del oxígeno en mineral fresco para las columnas PC 268 y PC 269, donde la columna PC 268 fue regada a condiciones normales y la PC 269 fue regada con solución de cianuro oxigenada.

La tabla 14 muestra la distribución granulométrica de la columna de 30 kilogramos para las mallas de 1 pulg, ½ pulgada y 10m. También muestra las leyes el contenido metálico por malla y total.

**Tabla 14. Datos de cabeza ensayada para el mineral 100% - 1" de las PC 268 y PC 269.**

Mallas (pulg)	PESO SECO (Kg)	PESO SECO DISTRIB. (%)	Au			Ag		
			Ley	Contenido metálico	Distribución	Ley	Contenido metálico	Distribución
			[g/t]	[mg]	[%]	[g/t]	[mg]	[%]
- 1"	13.80	46.00	0.235	3.2	25.2	1.59	21.9	30.7
- 1/2"	11.70	39.00	0.341	4.0	31.0	1.66	19.4	27.3
- 10m	4.50	15.00	1.254	5.6	43.8	6.65	29.9	42.0
<b>TOTAL</b>	<b>30.00</b>	<b>100.00</b>	<b>0.429</b>	<b>12.9</b>	<b>100.0</b>	<b>2.38</b>	<b>71.3</b>	<b>100.0</b>

**Fuente:Elaboración propia**

Los datos mostrados en la tabla 15 muestran el balance para el oro y plata, cantidad de reactivo utilizado, ratio S/M, tiempo de regado y el ratio de riego promedio para ambas columnas.

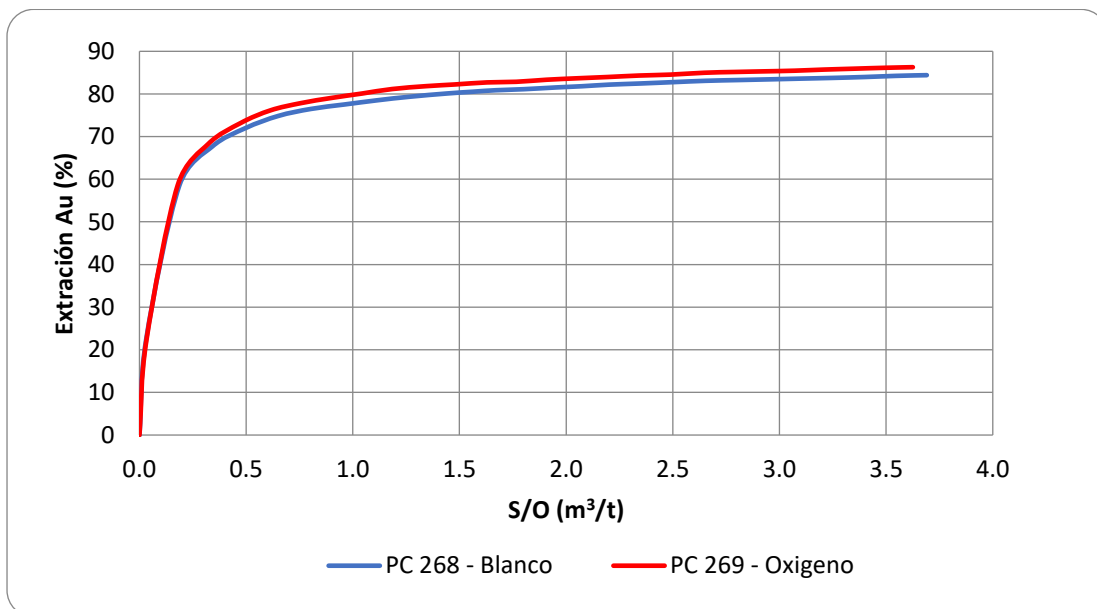
**Tabla 15. Balance de Cabeza calculada para PC 268 y PC 269.**

Muestra	Balance de Oro			Balance de Plata			Reactivos, kg/t		s/m m³/t	Tiempo (d)	Ratio de Riego L/h*m²
	*Cabeza	Cola	Ext.	*Cabeza	Cola	Ext.	NaCN	Cal			
	g/t	g/t	%	g/t	g/t	%					
PC 268 - Blanco	0.416	0.07	84.4	2.44	1.5	43.4	0.179	0.53	3.7	26	13.0
PC 269 - Oxígeno	0.450	0.06	86.3	2.46	1.4	46.0	0.190	0.53	3.6	26	12.7

**Fuente: Elaboración propia.**

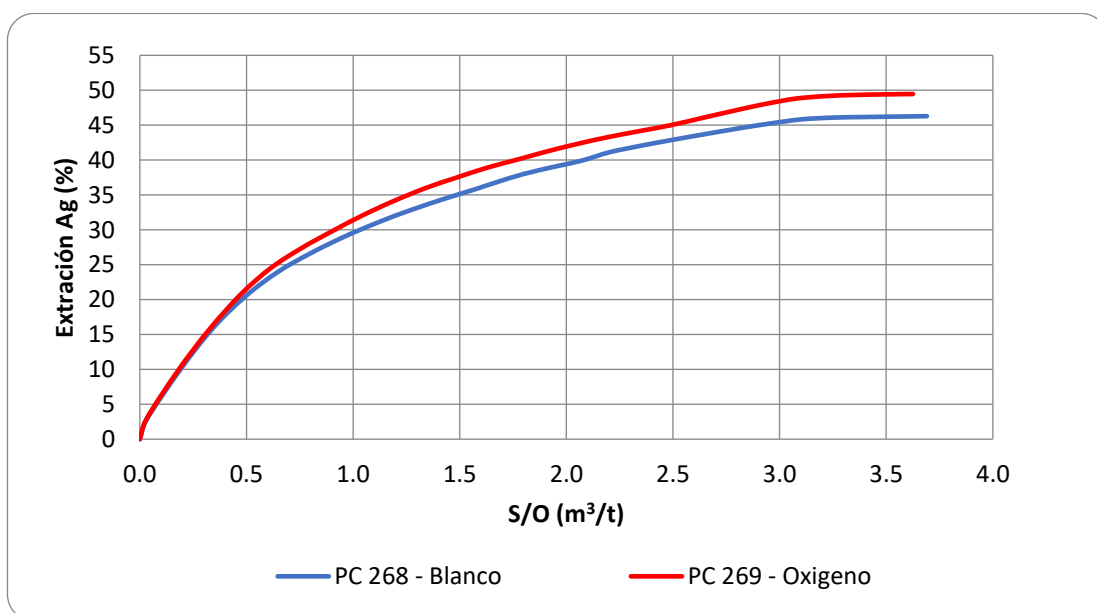
Se graficó la extracción para la cabeza calculada versus la ratio de riego y tiempo de riego en días en comparación con la extracción de oro y plata para la cabeza calculada.

**Figura 29. Extracción de oro vs ratio de riego para PC 268 y PC 269.**



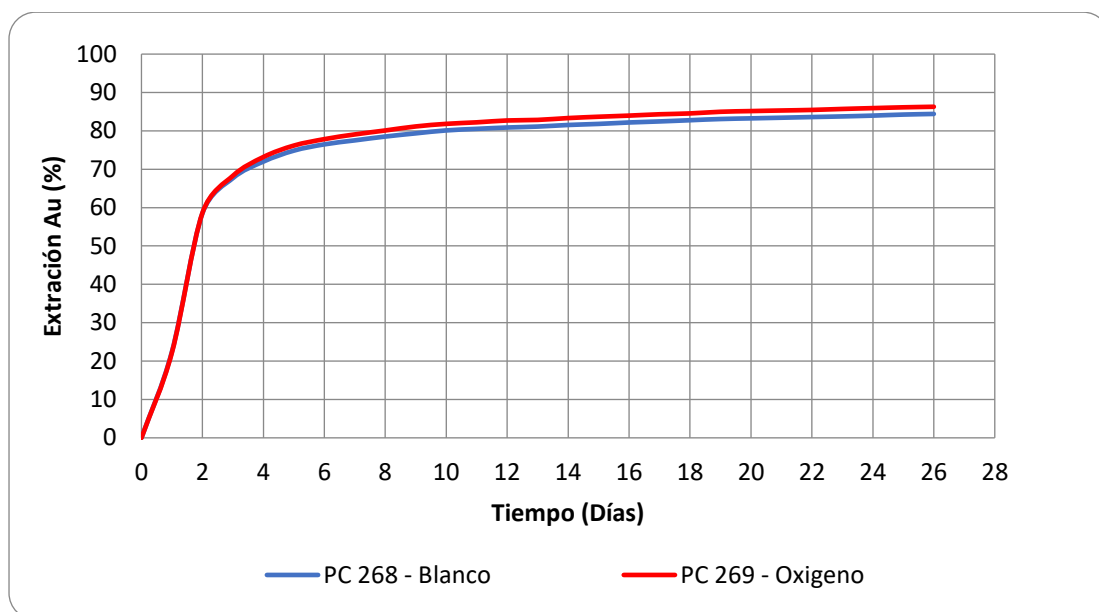
**Fuente: Elaboración propia.**

**Figura 30. Extracción de plata vs ratio de riego para PC 268 y PC 269.**



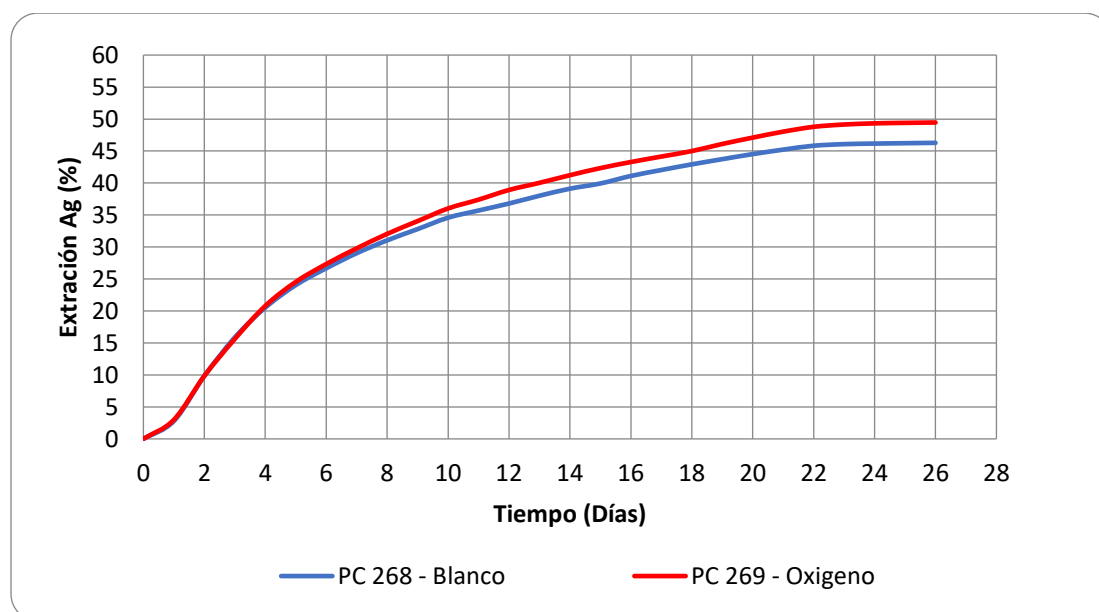
**Fuente: Elaboración propia.**

**Figura 31. Extracción de oro vs tiempo para PC 268 y PC 269.**



**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 32. Extracción de plata vs tiempo para PC 268 y PC 269.**



**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 29 se puede observar una mayor extracción de oro para las columnas regadas con solución oxigenada. En la figura 30 también ocurre una mejora en la lixiviación de plata.

### Pruebas en columna # 3

Se realizó una comparación del efecto del oxígeno en mineral fresco para las columnas PC 280 y PC 282, donde la columna PC 280 fue regada a condiciones normales y la PC 282 fue regada con solución de cianuro oxigenada.

La tabla 16 muestra la distribución granulométrica de la columna de 30 kilogramos para las mallas de 1 pulg, ½ pulgada y 10m. También muestra las leyes el contenido metálico por malla y total.

**Tabla 16. Datos de cabeza ensayada para el mineral 100% - 1" de las PC 280 y PC 282.**

Mallas (pulg)	PESO SECO (Kg)	PESO SECO DISTRIB. (%)	Au			Ag		
			Ley	Contenido metálico	Distribución	Ley	Contenido metálico	Distribución
			[g/t]	[mg]	[%]	[g/t]	[mg]	[%]
- 1"	12.20	40.67	0.16	1.93	23.18	2.20	26.84	43.06
- 1/2"	9.68	32.27	0.15	1.44	17.35	1.98	19.17	30.75
- 10m	8.12	27.07	0.61	4.95	59.47	2.01	16.32	26.19
TOTAL	<b>30.00</b>	100.00	<b>0.28</b>	8.32	100.00	<b>2.08</b>	62.33	100.00

**Fuente: Elaboración propia.**

Los datos mostrados en la tabla 17 muestran el balance para el oro y plata, cantidad de reactivo utilizado, ratio S/M, tiempo de regado y el ratio de riego promedio para ambas columnas.

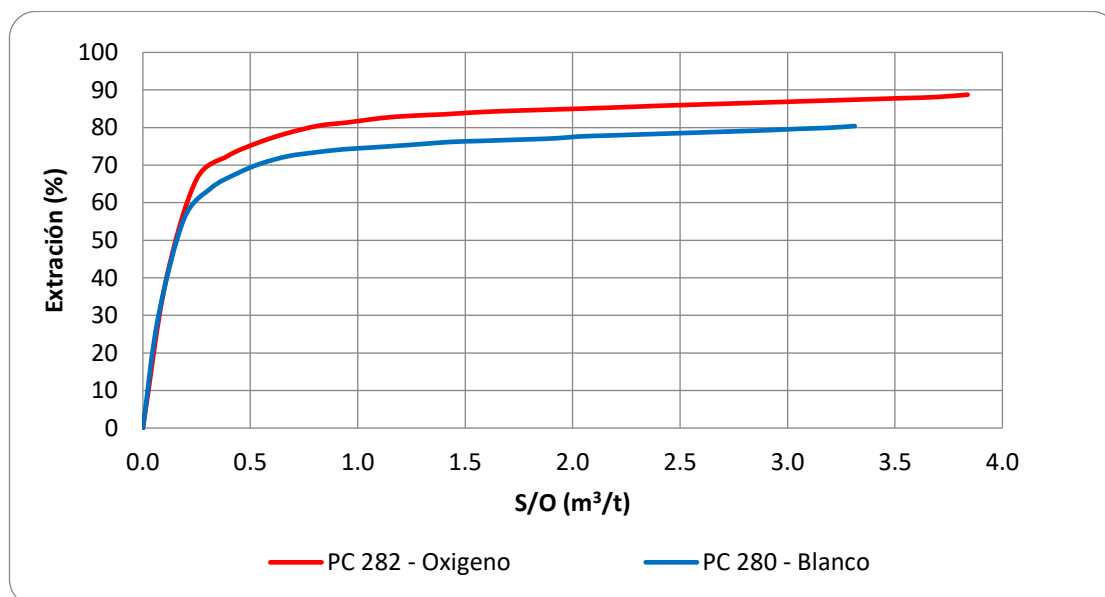
**Tabla 17. Balance de Cabeza calculada para PC 280 y PC 282.**

Muestra	Balance de Oro			Balance de Plata			Reactivos, kg/t		s/m m³/t	Tiempo (d)	Ratio de Riego L/h*m²
	*Cabeza	Cola	Ext.	*Cabeza	Cola	Ext.	NaCN	Cal			
	g/t	g/t	%	g/t	g/t	%					
PC 280 – Blanco	0.265	0.05	80.40	1.98	1.13	42.88	0.116	0.65	3.3	26	11.1
PC 282 – Oxígeno	0.278	0.03	88.75	1.96	1.01	48.62	0.120	0.65	3.8	26	12.7

**Fuente: Elaboración propia.**

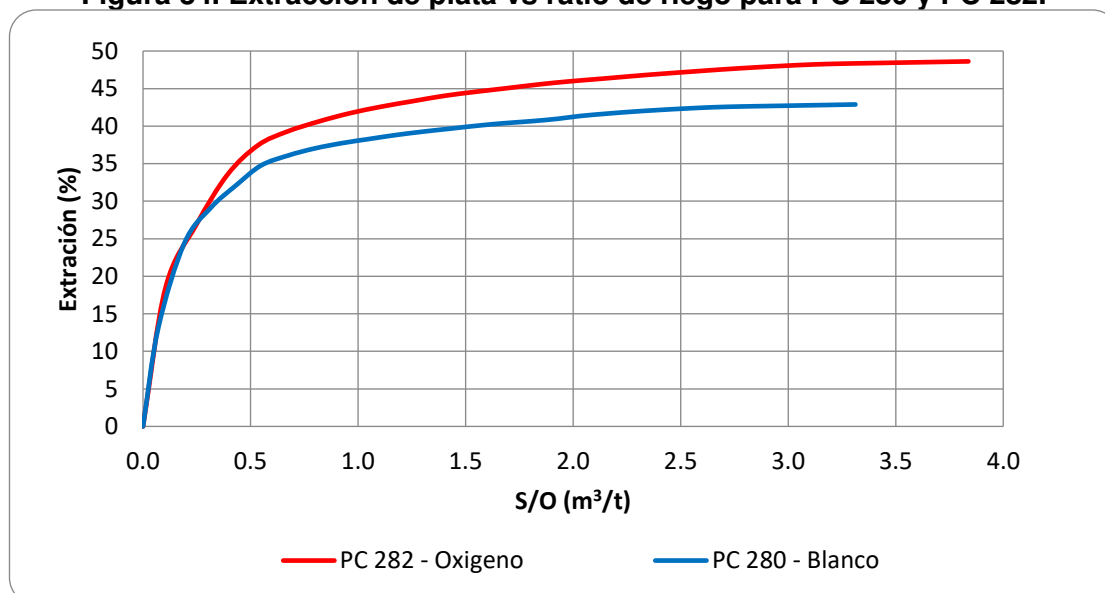
Se graficó la extracción para la cabeza calculada versus la ratio de riego y tiempo de riego en días en comparación con la extracción de oro y plata para la cabeza calculada.

**Figura 33. Extracción de oro vs ratio de riego para PC 280 y PC 282.**



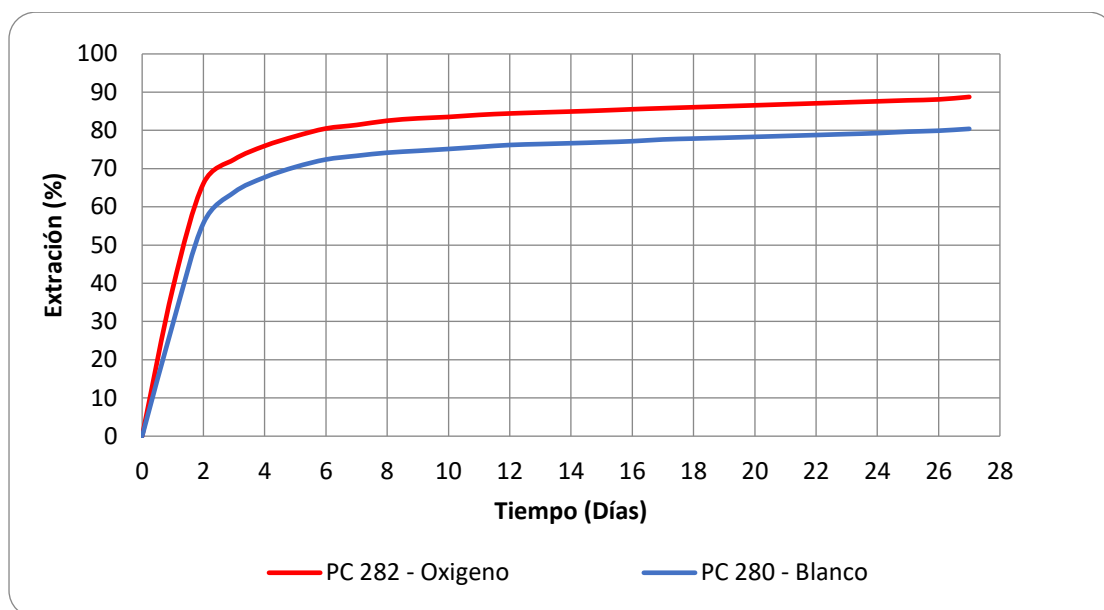
**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 34. Extracción de plata vs ratio de riego para PC 280 y PC 282.**



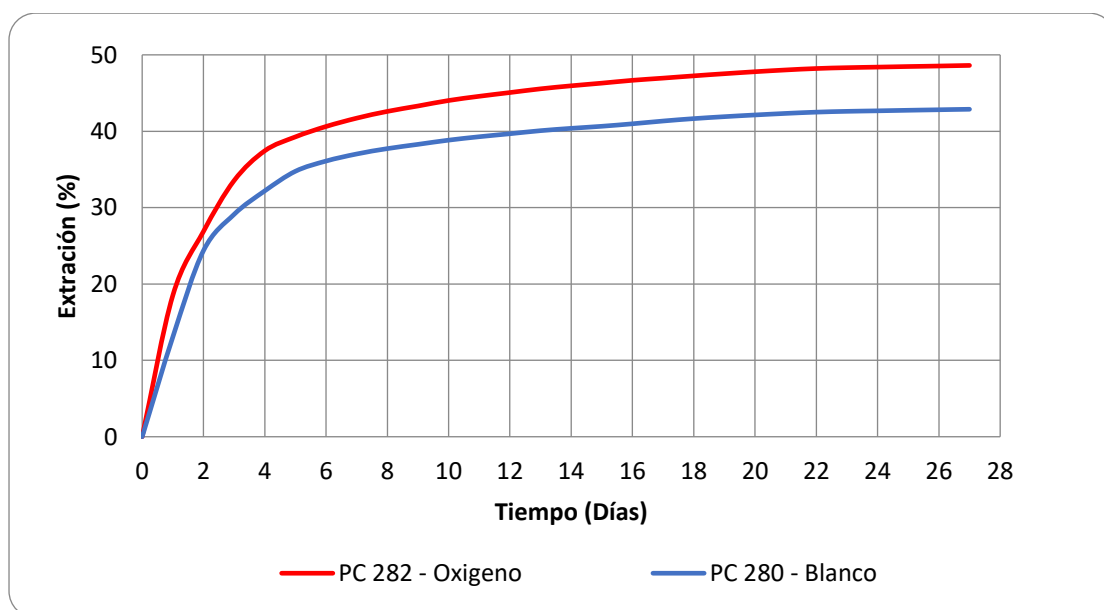
**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 35. Extracción de oro vs tiempo para PC 280 y PC 282.**



**Fuente: Elaboración propia.**

**Figura 36. Extracción de plata vs tiempo para PC 280 y PC 282.**



**Fuente: Elaboración propia.**

En la figura 33 se puede observar una mayor extracción de oro para las columnas regadas con solución oxigenada. En la figura 34 se puede observar que la mejora también para la lixiviación de plata.



### Pruebas en columna # 4

Se realizó una comparación del efecto del oxígeno en mineral ripio para las columnas PC 265 y PC 266, donde la columna PC 265 fue regada a condiciones normales y la PC 266 fue regada con solución de cianuro oxigenada.

La tabla 18 muestra la distribución granulométrica de la columna de 20 kilogramos para las mallas de 1 pulg, ½ pulgada y 10m. También muestra las leyes el contenido metálico por malla y total.

**Tabla 18. Datos de cabeza ensaya para el mineral de las PC 265 y PC 266.**

Mallas (pulg)	PESO SECO (Kg)	PESO SECO DISTRIB. (%)	Au			Ag		
			Ley	Contenido metálico	Distribución	Ley	Contenido metálico	Distribución
			[g/t]	[mg]	[%]	[g/t]	[mg]	[%]
- 1"	11.13	55.65	0.058	0.65	49.75	5.04	56.08	68.25
- 1/2"	5.59	27.95	0.065	0.36	28.00	3.23	18.06	21.97
- 10m	3.28	16.40	0.088	0.29	22.25	2.45	8.04	9.78
TOTAL	<b>20.00</b>	100.00	<b>0.065</b>	1.30	100.0	<b>4.11</b>	82.18	100.0

**Fuente: Elaboración propia.**

Los datos mostrados en la tabla 19 muestran el balance para el oro y plata, cantidad de reactivo utilizado, ratio S/M, tiempo de regado y el ratio de riego promedio para ambas columnas.

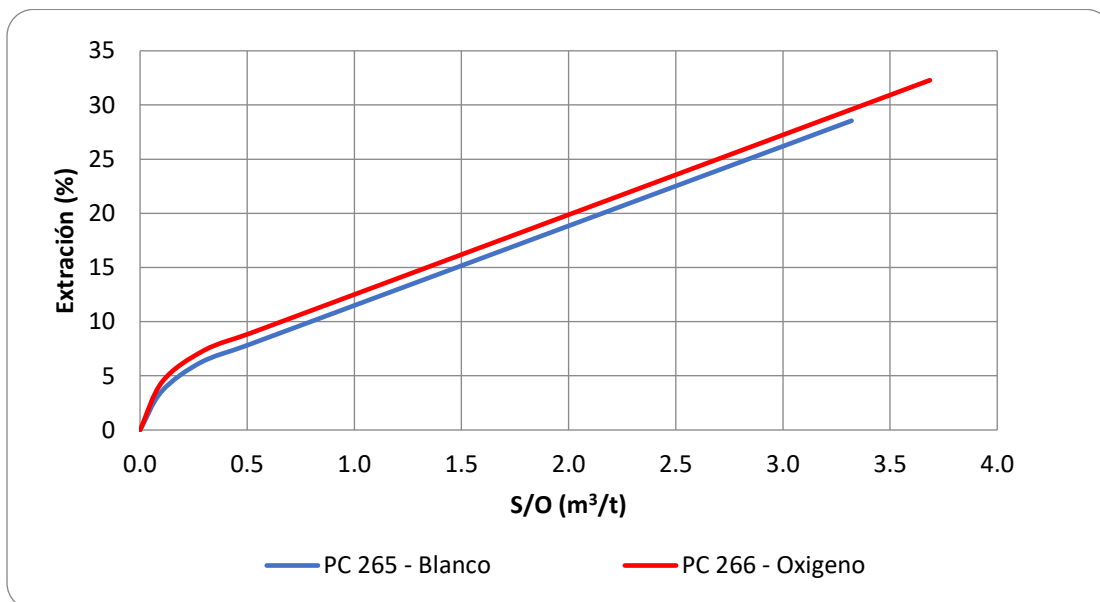
**Tabla 19. Balance de Cabeza calculada para PC 265 y PC 266.**

Muestra	Balance de Oro			Balance de Plata			Reactivos, kg/t		s/m m³/t	Tiempo (d)	Ratio de Riego L/h*m²
	*Cabeza	Cola	Ext.	*Cabeza	Cola	Ext.	NaCN	Cal			
	g/t	g/t	%	g/t	g/t	%					
PC 265 – Blanco	0.068	0.05	28.5	4.23	3.95	6.56	0.100	0.13	3.6	18	11.2
PC 266 – Oxígeno	0.068	0.05	32.3	4.23	3.93	6.93	0.103	0.13	3.7	18	12.4

**Fuente: Elaboración propia.**

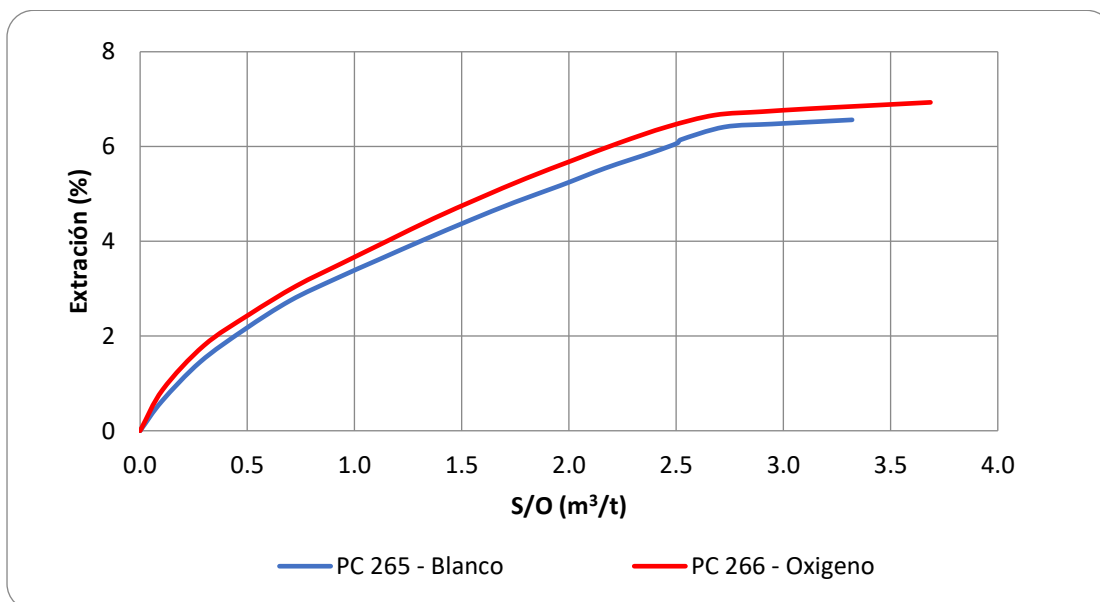
Se graficó la extracción para la cabeza calculada versus la ratio de riego y tiempo de riego en días en comparación con la extracción de oro y plata para la cabeza calculada.

**Figura 37. Extracción de oro vs ratio de riego para PC 265 y PC 266.**



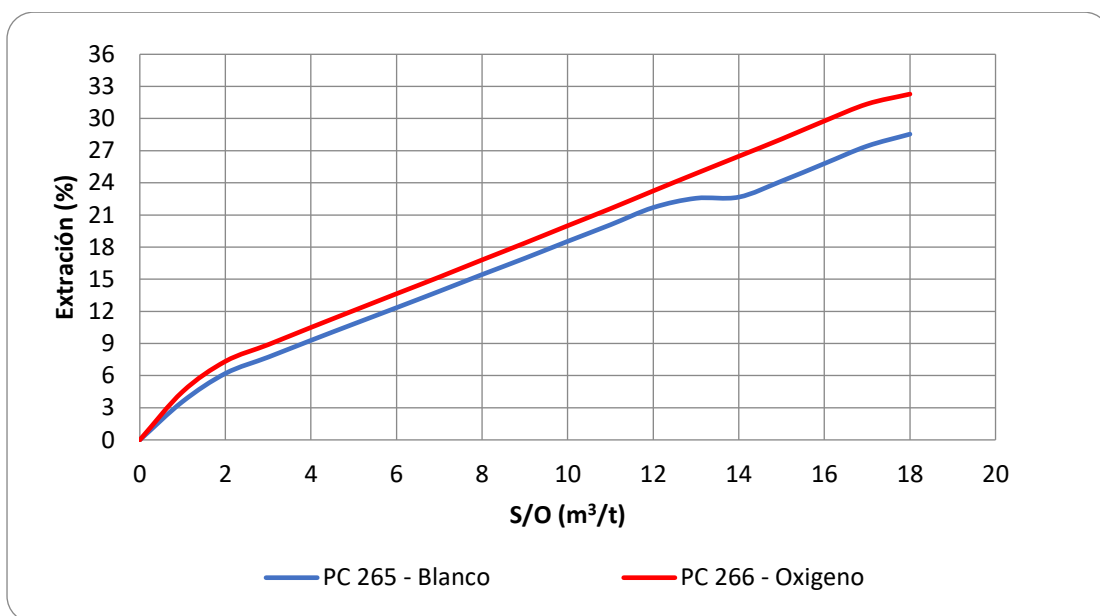
**Fuente: Elaboración propia.**

**Figura 38. Extracción de plata vs ratio de riego para PC 265 y PC 266.**



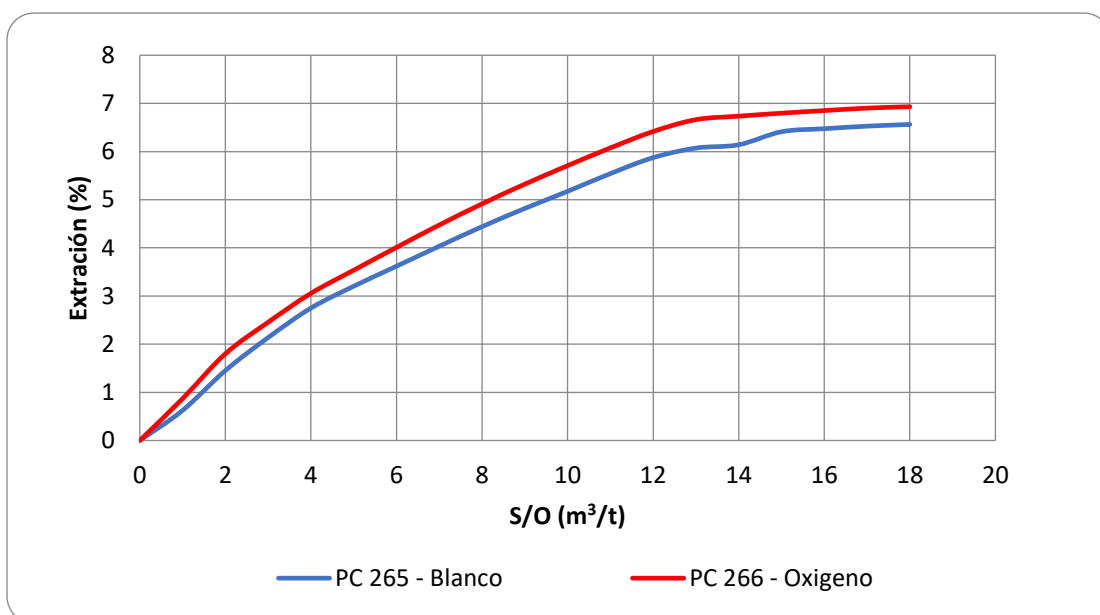
**Fuente : Elaboración propia.**

**Figura 39. Extracción de oro vs tiempo para PC 265 y PC 266.**



**Fuente : Elaboración propia.**

**Figura 40. Extracción de plata vs tiempo para PC 265 y PC 266.**



**Fuente : Elaboración propia.**

En la figura 37 se puede observar una mayor extracción de oro para las columnas regadas con solución oxigenada. En la figura 38 ocurre una mejora más notoria en lixiviación de la plata.

### Pruebas en columna # 5

Se realizó una comparación del efecto del oxígeno en mineral ripio para las columnas PC 270 y PC 271, donde la columna PC 270 fue regada a condiciones normales y la PC 271 fue regada con solución de cianuro oxigenada.

La tabla 20 muestra la distribución granulométrica de la columna de 30 kilogramos para las mallas de 1 pulg, ½ pulgada y 10m. También muestra las leyes el contenido metálico por malla y total.

**Tabla 20. Datos de cabeza ensayada para el mineral de las PC 270 y PC 271.**

Mallas (pulg)	PESO SECO (Kg)	PESO SECO DISTRIB. (%)	Au			Ag		
			Ley	Contenido metálico	Distribución	Ley	Contenido metálico	Distribución
			[g/t]	[mg]	[%]	[g/t]	[mg]	[%]
- 1"	14.16	47.20	0.039	0.55	32.29	2.20	31.17	49.74
- 1/2"	9.62	32.07	0.046	0.44	25.88	1.98	19.02	30.35
- 10m	6.22	20.73	0.115	0.72	41.83	2.01	12.48	19.91
TOTAL	<b>30.00</b>	100.00	<b>0.057</b>	1.71	100.00	<b>2.09</b>	62.66	100.00

**Fuente : Elaboración propia.**

Los datos mostrados en la tabla 21 muestran el balance para el oro y plata, cantidad de reactivo utilizado, ratio S/M, tiempo de regado y el ratio de riego promedio para ambas columnas.

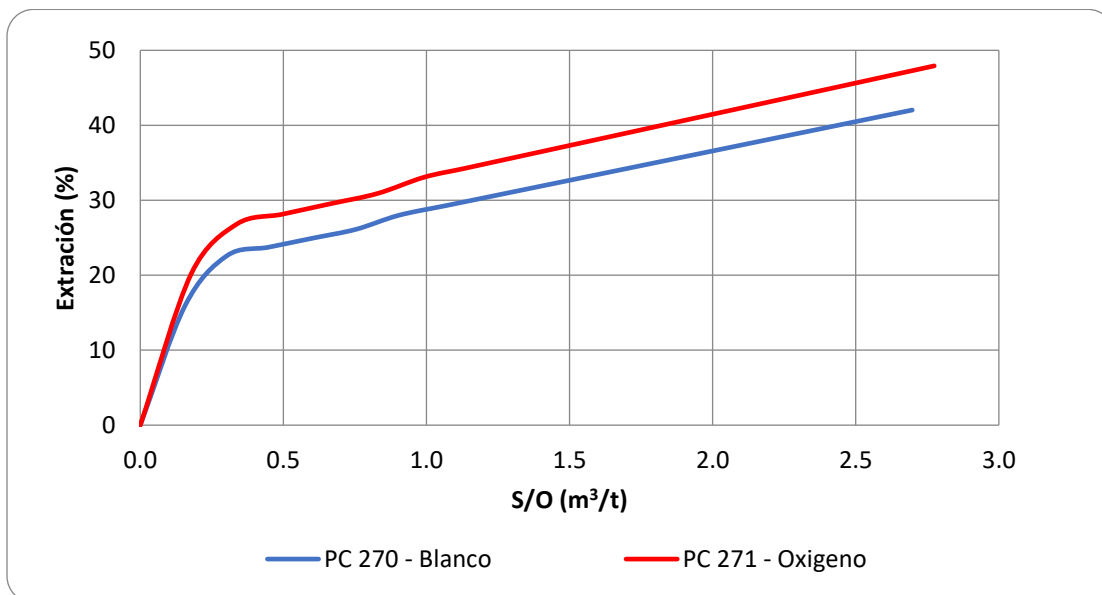
**Tabla 21. Balance de Cabeza calculada para PC 270 y PC 271.**

Muestra	Balance de Oro			Balance de Plata			Reactivos, kg/t		s/m m³/t	Tiempo (d)	Ratio de Riego L/h*m²
	*Cabeza	Cola	Ext.	*Cabeza	Cola	Ext.	NaCN	Cal			
	g/t	g/t	%	g/t	g/t	%					
PC 270 – Blanco	0.059	0.04	42.5	2.17	1.76	18.8	0.107	0.0	2.7	18	13.2
PC 271 – Oxígeno	0.060	0.03	47.9	2.11	1.69	20.1	0.110	0.0	2.8	18	13.5

**Fuente : Elaboración propia.**

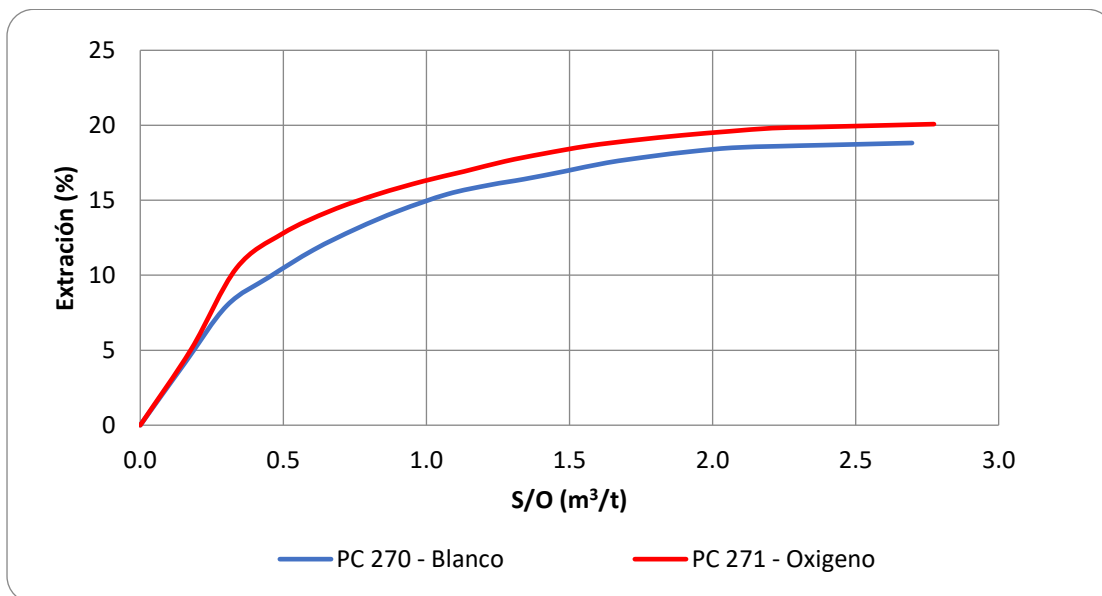
Se graficó la extracción para la cabeza calculada versus la ratio de riego y tiempo de riego en días en comparación con la extracción de oro y plata para la cabeza calculada.

**Figura 41 Extracción de oro vs ratio de riego para PC 270 y PC 271.**



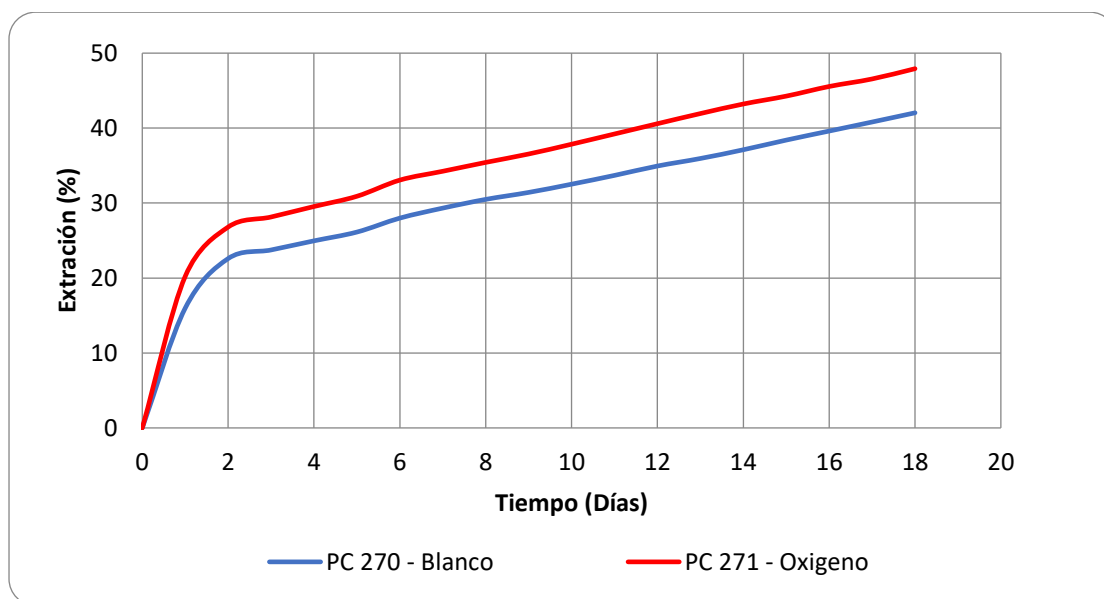
**Fuente: Elaboración propia.**

**Figura 42. Extracción de plata vs ratio de riego para PC 270 y PC 271.**



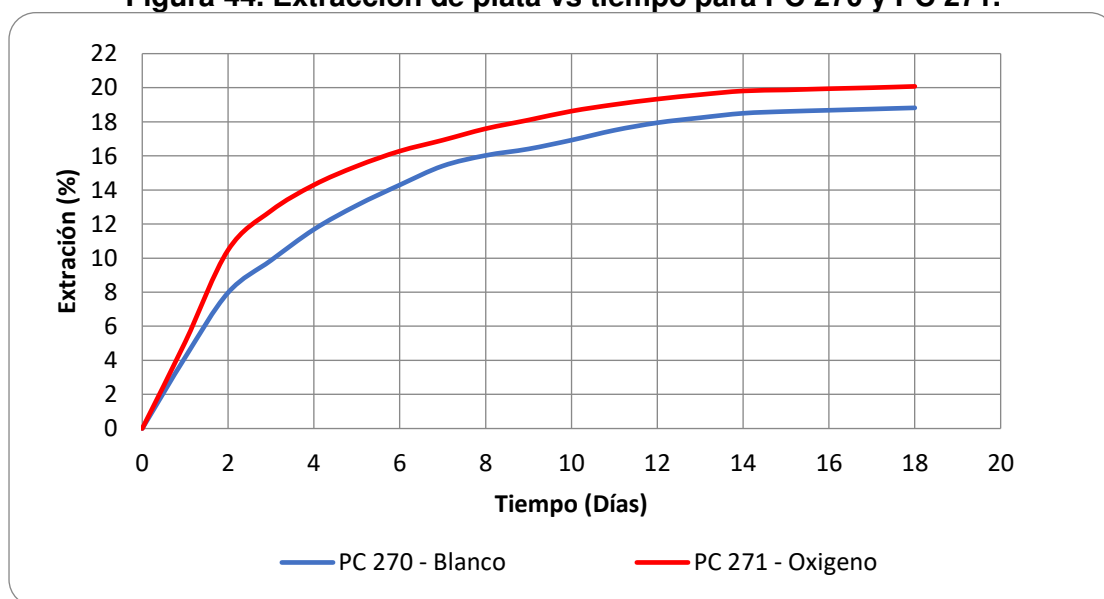
**Fuente: Elaboración propia.**

**Figura 43. Extracción de oro vs tiempo para PC 270 y PC 271.**



**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 44. Extracción de plata vs tiempo para PC 270 y PC 271.**



**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 41 se puede observar una mayor extracción de oro para las columnas regadas con solución oxigenada. En la figura 42 también ocurre una mejora para la lixiviación de plata pero no es tan notoria como para el caso del oro.

### Pruebas en columna # 6

Se realizó una comparación del efecto del oxígeno en mineral ripio para las columnas PC 281 y PC 283 , donde la columna PC 281 fue regada a condiciones normales y la PC 271 fue regada con solución de cianuro oxigenada.

La tabla 22 muestra la distribución granulométrica de la columna de 30 kilogramos para las mallas de 1 pulg, ½ pulgada y 10m. También muestra las leyes el contenido metálico por malla y total.

**Tabla 22. Datos de cabeza ensaya para el mineral de las PC 281 y PC 283.**

Mallas (pulg)	PESO SECO (Kg)	PESO SECO DISTRIB. (%)	Au			Ag		
			Ley	Contenido metálico	Distribución	Ley	Contenido metálico	Distribución
			[g/t]	[mg]	[%]	[g/t]	[mg]	[%]
- 1"	12.56	41.87	0.062	0.78	27.96	3.94	49.49	47.28
- 1/2"	9.20	30.67	0.082	0.75	27.08	3.05	28.05	26.80
- 10m	8.24	27.47	0.152	1.25	44.96	3.29	27.13	25.92
<b>TOTAL</b>	<b>30.00</b>	<b>100.00</b>	<b>0.093</b>	<b>2.79</b>	<b>100.00</b>	<b>3.49</b>	<b>104.67</b>	<b>100.00</b>

**Fuente: Elaboración propia**

Los datos mostrados en la tabla 23 muestran el balance para el oro y plata, cantidad de reactivo utilizado, ratio S/M, tiempo de regado y el ratio de riego promedio para ambas columnas.

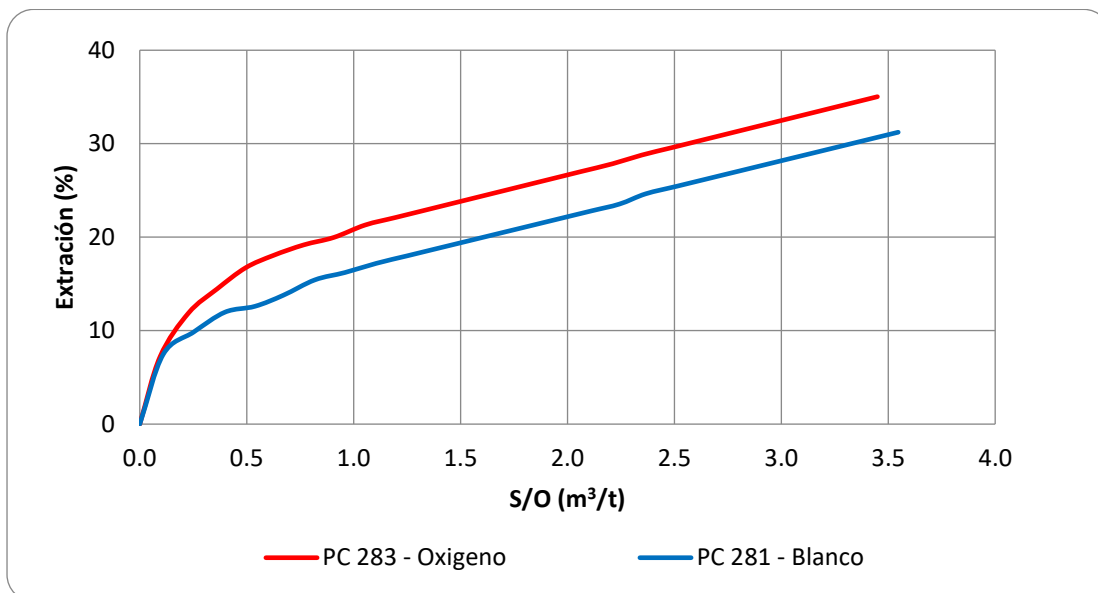
**Tabla 23. Balance de Cabeza calculada para las PC 281 y PC 283.**

Muestra	Balance de Oro			Balance de Plata			Reactivos, kg/t		s/m m³/t	Tiempo (d)	Ratio de Riego L/h*m²
	*Cabeza	Cola	Ext.	*Cabeza	Cola	Ext.	NaCN	Cal			
	g/t	g/t	%	g/t	g/t	%					
PC 281 – Blanco	0.090	0.062	31.2	3.58	2.74	23.42	0.13	0.0	3.5	25	12.7
PC 283 – Oxígeno	0.088	0.057	35.0	3.61	2.78	23.10	0.11	0.0	3.4	25	12.4

**Fuente: Elaboración propia**

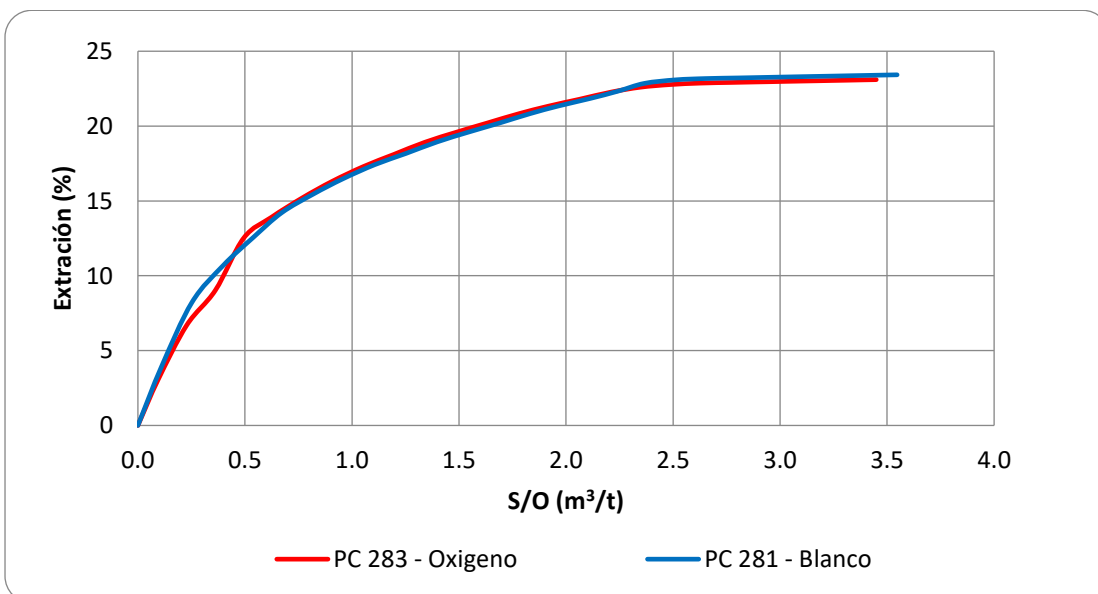
Se graficó la extracción para la cabeza calculada versus la ratio de riego y tiempo de riego en días en comparación con la extracción de oro y plata para la cabeza calculada.

**Figura 45. Extracción de oro vs ratio de riego para PC 281 y PC 283.**



**Fuente: Elaboración propia**

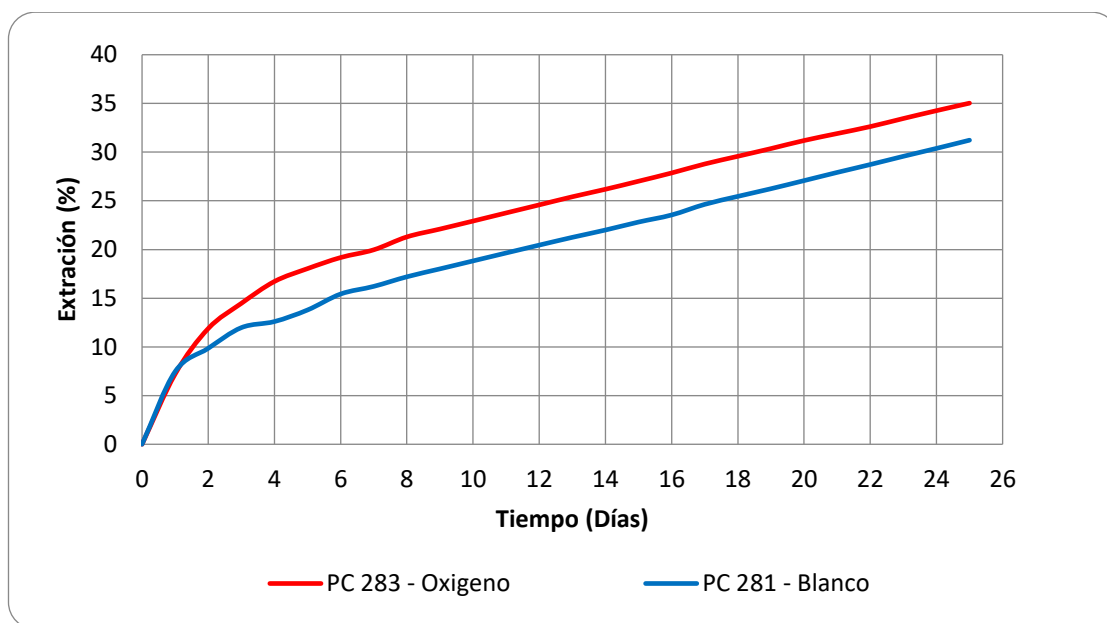
**Figura 46. Extracción de plata vs ratio de riego para PC 281 y PC 283.**



**Fuente: Elaboración propia**

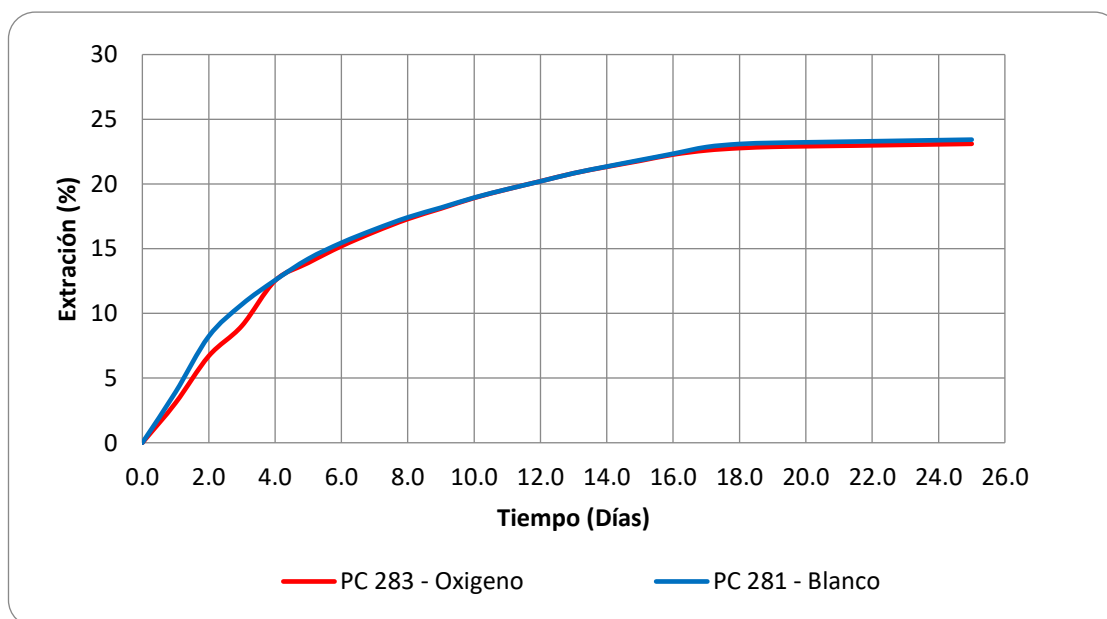


**Figura 47. Extracción de oro vs tiempo para PC 281 y PC 283.**



**Fuente: Elaboración propia**

**Figura 48. Extracción de plata vs tiempo para PC 281 y PC 283.**



**Fuente: Elaboración propia**

En la figura 45 se puede observar una mayor extracción de oro para las columnas regadas con solución oxigenada. En la figura 46 se puede observar que no hay mejora en la lixiviación de plata y se obtienen prácticamente los mismos resultados.

## **CAPÍTULO 5**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **5.1 Resultados de pruebas de oxigenación.**

##### **5.1.1 Resultados de pruebas con inyección de aire**

Según los resultados de las pruebas realizadas con inyección de aire , este no aumenta significativamente la concentración de oxígeno en la solución llegando solamente a los valores de 8.49 ppm cuando se realizó la inyección con una presión de 40 psi, 8.52 ppm a una presión de 50 psi y 8.46 ppm a una presión de 100 psi, a pesar de que la inyección se realizó de manera continua durante todo el tiempo que duró la prueba.

Los valores de pH no sufrieron mayor variación, encontrándose entre los valores de 10.2 y 10.8 para las pruebas realizadas; con respecto a los valores de la fuerza de cianuro en la solución, estos disminuyeron desde un valor de 70 ppm hasta 66 ppm para la primera prueba. Para la segunda prueba disminuyo de 70 ppm hasta 66 ppm y finalmente en la tercera prueba la disminución fue desde 70 ppm hasta 65 ppm.

Estas pruebas realizadas inyectando aire se hicieron para poder determinar si el aire era una buena opción para este tipo de pruebas, lo cual se pudo comprobar que es un mal agente para poder aumentar la concentración de oxígeno en la solución a un mayor de 8 ppm.

##### **5.1.2 Resultados de pruebas de inyección de oxígeno**

Los resultados obtenidos en estas pruebas muestran que la concentración de oxígeno aumenta de manera más efectiva que cuando se utilizó el aire.

Como se mencionó anteriormente los tiempos de inyección no fueron continuos debido a que se utilizó oxígeno puro pero en comparación al aire que contiene solo un 21% de oxígeno, este sería más efectivo al momento de realizar la inyección. También para cada tiempo de inyección esta se realizó a diferentes presiones siendo estas de 50, 100 y 150 psi.

Para una inyección a 50 psi se realizó inyección en intervalos de 3 y 5 minutos, para el caso de los intervalos de 3 minutos en la primera inyección la concentración subió desde 7.60 ppm hasta los 12.35 ppm, para la segunda inyección aumento la concentración desde 12.25 ppm hasta 15.95 ppm y en la última inyección de aire, la concentración subió desde 15.76 ppm hasta 17.66 ppm. En el caso de 5 minutos de inyección la concentración subió desde 7.62 ppm hasta 12.45 ppm para la primera inyección, desde 12.21 ppm hasta 16.25 ppm y para la tercera inyección. En estos casos para nuestro objetivo de poder estabilizar la concentración de oxígeno a 20 ppm se diferencia por un aproximado de 4 ppm para poder llegar a la concentración necesaria, para poder llegar a ese objetivo se procedió a aumentar la presión de la inyección

En las pruebas que se realizaron a 100 psi se obtuvieron resultados con mayores concentraciones. Para una inyección de 3 minutos aumentaron en la primera inyección desde 7.7 ppm hasta 12.45, en la segunda inyección desde 12.21 ppm hasta 16.25 ppm y en la tercera inyección desde 16.05 ppm hasta 18.55 ppm, al finalizar la prueba al día siguiente la última medición tuvo un valor de 16.88 ppm. La fuerza de cianuro durante toda la prueba que se realizó bajo desde 70 hasta un valor de 63. Para la inyección de 5 minutos las concentración aumentó desde 7.67 hasta 15.55 ppm para la primera inyección, de 15.50 ppm hasta 19.00 ppm para la segunda inyección y 19.85 ppm hasta 21.7 para la

última inyección, al finalizar la prueba la última medición de la concentración de oxígeno tuvo un valor de 18.6 ppm. Para la última inyección de 5 minutos de llego a un valor de 19.85, el cual es un valor adecuado para realizar las pruebas. Este dato se tuvo como valor referencial, pero se decidió realizar una última ronda de pruebas donde se elevó la presión de la inyección hasta 150 psi.

En la última ronda de pruebas que se realizaron a una presión de 150 psi para el caso de inyección de 3 minutos se inició con una concentración de 7.45 ppm de oxígeno llegando a tener una concentración final de 12.71 ppm, 16.65 ppm y 19.8 ppm para las 3 inyecciones. Como se observa se llegó a 19.8 que es un valor similar a que cuando se realizó a 100 psi por un lapso de 3 minutos. Se precedió a realizar una inyección de 5 minutos llegando a los valores de 19.5 ppm, 22.65 ppm y 25.4 ppm para las 3 inyecciones desde una concentración inicial de 7.40 ppm

De esto se decidió que el tiempo de inyección para todas las pruebas sería de 5 minutos para cada vez que se cambiara la solución de riego.

Con respecto a los valores de pH y fuerza de cianuro estos mantuvieron los valores esperados que para el caso de una solución sin exceso de oxígeno.

## **5.2 Resultados de las pruebas en columnas**

Para estas pruebas se trabajó con mineral fresco y mineral ripio para poder tener una idea más clara de si el efecto de aumento en la recuperación se da para ambos tipo de mineral. Las pruebas número 1, 2 y 3 se realizaron mineral fresco y las pruebas restantes 4,5 y 6 se realizaron con mineral ripio.

### **Prueba 1**

Para la primera ronda de pruebas en columna se tuvo a la columna PC 262 , columna regada a condiciones normales ,y PC 263 ,columna regada con solución oxigenada , ambas fueron llenadas con mineral con una ley de 0.597 g/TM de oro y 3.06 g/TM de plata para análisis de cabeza ensayada las leyes de cabeza calculada para la PC 262 corresponden a un valor de 0.604 gr/TM para el oro y 3.18 gr/TM para la plata , estos valores nos da unas variaciones de 1.19% y 4.04% con respecto a la cabeza ensayada .En la columna PC 263 las leyes de cabeza calculada son 0.629 gr/TM para el oro y 3.25 gr/TM para la plata , estos valores nos da unas variaciones de 5.32 % y 4.47 % .Estos valores están dentro del rango de aceptación para realizar los balances metalúrgicos .

En la columna PC 263 se obtuvo una recuperación mayor de 2.4 % para el caso del oro, sin embargo, para el caso de la plata la recuperación mayor se dio en la columna PC 262 con un adicional de 5.2 % de recuperación de plata , dicha columna fue regada con solución de cianuro a condiciones normales

### **Prueba 2**

En la segunda ronda de pruebas se analizó las columnas PC 268 , columna regada a condiciones normales , y PC 269,columna regada con solución oxigenada , las cuales fueron llenadas con mineral con ley de 0.429 gr/TM de oro y 2.38 gr/TM de plata para cabeza ensayada, las leyes de cabeza calculada para la PC 268 de 0.416 gr/TM de oro y 2.44 gr/TM de plata obteniendo unas variaciones con respecto a la cabeza ensayada de 3.13 % y 2.72 % respectivamente , para el caso de la PC 269 las leyes de cabeza calculada fueron de 0.450 gr/TM para el caso del oro y de 2.46 gr/TM para el caso de la plata , las variaciones fueron de 4.82 % y 3.55 % respectivamente . Estos

valores de variaciones están dentro del rango aceptable para realizar el balance metalúrgico.

En la columna PC 268 se obtuvo una recuperación de 83.6 % de Au en comparación a la recuperación obtenida en la PC 269 que fue de 85.6 & % lo que nos representa un aumento del 5 % en la recuperación de oro debido a los efectos del oxígeno en solución.

Para el caso de la plata la recuperación la PC 269 fue de 46.28 % y en la PC 268 fue de 49.46 % lo que nos da un adicional de 3.18% de recuperación.

### **Prueba 3**

En esta ronda de pruebas la columna PC 280 fue regada a condiciones normales y la PC 282 regada con solución oxigenada , las cuales fueron llenadas con mineral de ley de 0.277 gr/TM de oro y de 2.08 gr/TM de plata para cabeza ensayada , las leyes de cabeza calculada para la PC 280 fueron de 0.265 gr/TM de oro y 1.98 gr/TM de plata lo que da unas variaciones con respecto a la cabeza ensayada de 4.55 % y 4.70 % respectivamente , para el caso de PC 282 las leyes de cabeza calculada fueron de 0.278 gr/TM de oro y 1.98 gr/TM de plata lo que nos da variaciones de 0.45 % y 4.78 % respectivamente . Estas variaciones están dentro del rango aceptable para realizar el balance metalúrgico.

La recuperación de oro en la columna PC 282 fue de 88.75 % en comparación con la columna PC 280 donde la recuperación fue de 80.40 %, teniendo un adicional de 8.35 % para la columna regada con solución oxigenada. En el caso de la plata también se observa un aumento de recuperación siendo en la columna PC 280 de 42.88 % y en la PC 282 de 49.16 % teniendo un adicional de 6.28 % de recuperación de plata.

#### **Prueba 4**

La columnas PC 265 fue regada a condicione normales y la columna PC 266 fue regada con solución oxigenada, las cuales fueron llenadas con mineral con ley de 0.065 gr/TM de oro y ley de 4.11 gr/TM, este valor de ley en plata en particular es alto teniendo en cuenta que el mineral tratado es mineral ripio, este mineral proviene del PAD de lixiviación por lo que puede sugerir que la mayor parte de esta plata en el mineral no es cianurable.

Para los casos de las variaciones en la PC 265 y PC 266 la ley de cabeza calculada fue de 0.068 gr/TM de oro y de 4.23 gr/TM de plata lo que nos da variaciones de 4.88 % y 2.85 % respectivamente para el caso de la PC 265 y para la PC 266 los errores fueron de 4.66 % de oro y 2.86 % de plata. Los valores de las variaciones se encuentran dentro del rango aceptable para realizar el balance metalúrgico.

Para el caso de recuperación de oro en la columna PC 265 se obtiene una recuperación de 28.5 % mientras que la columna PC 266 se obtiene una recuperación de 32.3 % lo que nos da un aumento de recuperación de oro de 3.7 %. En el caso de la plata la recuperación en la PC 265 es de 6.56 % y en la PC 266 de 6.93 % lo que nos da un pequeño aumento en la recuperación de 0.37%.

#### **Prueba 5**

La columna PC 270 fue regada a condiciones normales mientras que la columna PC 271 fue regada con solución oxigenada. La ley de mineral en estas columnas es de 0.057 gr/TM de oro y de 2.09 gr/TM de plata , las leyes de cabeza calculada para la PC 270 fueron de 0.059 gr/TM de oro y 2.17 gr/TM de plata lo que da unas variaciones con respecto a la cabeza ensayada de 3.76 % y 3.99 % respectivamente , para el caso de PC 271 las leyes de cabeza calculada fueron de 0.060 gr/TM de oro y 2.11

gr/TM de plata lo que nos da variaciones de 5.24 % y 1.06 % respectivamente . Estas variaciones están dentro del rango aceptable para realizar el balance metalúrgico.

La recuperación de oro en la columna PC 271 fue de 47.9 % en comparación con la columna PC 270 donde la recuperación fue de 45.4 %, teniendo un adicional de 2.50 % para la columna regada con solución oxigenada. En el caso de la plata también se observa un aumento de recuperación siendo en la columna PC 270 de 18.8 % y en la PC 271 de 20.1 % teniendo un adicional de 1.3 % de recuperación de plata.

### **Prueba 6**

La columna PC 281 fue regada a condiciones normales mientras que la columna PC 283 fue regada con solución oxigenada. La ley de mineral en estas columnas es de 0.093 gr/TM de oro y de 3.49 gr/TM de plata , las leyes de cabeza calculada para la PC 281 fueron de 0.090 gr/TM de oro y 3.58 gr/TM de plata lo que da unas variaciones con respecto a la cabeza ensayada de 3.50 % y 2.61 % respectivamente , para el caso de PC 283 las leyes de cabeza calculada fueron de 0.088 gr/TM de oro y 3.61 gr/TM de plata lo que nos da variaciones de 4.98 % y 3.61 % respectivamente . Estas variaciones están dentro del rango aceptable para realizar el balance metalúrgico.

La recuperación de oro en la columna PC 283 fue de 35.0 % en comparación con la columna PC 281 donde la recuperación fue de 31.2 %, teniendo un adicional de 3.8 % para la columna regada con solución oxigenada. En el caso de la plata no se observa un aumento de recuperación siendo en la columna PC 283 de 23.10 % y en la PC 281 de 23.42 %.



## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### CONCLUSIONES

- Según las pruebas de oxigenación y las pruebas de lixiviación en columnas se puede observar que las microburbujas de oxígeno son estables en el tiempo y no afectan el pH y fuerza de cianuro en la solución, además al estar en una mayor concentración en la solución de cianuro aumentan la recuperación de oro y plata en un 8.35% para la prueba 3 de lixiviación en columnas y el mayor aumento de recuperación de plata fue de 6.28% también para la prueba 3 de lixiviación en columnas.
- En las pruebas de inyección de aire de la primera parte de la investigación, a pesar de ser continua, no satisface la concentración de oxígeno necesaria para llegar al valor mínimo recomendado de concentración de ppm.
- Según las pruebas de inyección de oxígeno de la primera parte de la investigación, la concentración de cianuro no presenta una disminución apreciable debido a la presencia de aire y oxígeno en la solución.
- El pH no se vio afectado por la inyección de aire y oxígeno en la solución.
- La presión ideal para realizar la inyección de oxígeno en la solución de cianuro que será utilizada en pruebas de columnas es de 5 minutos para 150 psi de presión de inyección, también se podría utilizar la opción de realizar la inyección a 100 psi durante 15 minutos.
- De acuerdo con los datos experimentales obtenidos en la segunda parte de la investigación se puede deducir que habrá una mejora económica del en el proceso de 8.35% de recuperación, sin embargo, para poder deducir si a escala industrial tendrá el mismo impacto se tiene que seguir con pruebas piloto y pruebas industriales

- Se comprobó el efecto que tiene el oxígeno en el aumento de la recuperación de oro y plata para mineral ripio, el mayor aumento de recuperación de oro fue de 3.7 % para la prueba 4 y el mayor aumento de recuperación de plata fue de 1.3% también para la prueba 5.

## RECOMENDACIONES

- Para realizar las inyecciones se debe tener en cuenta de que este no pase de los 20 ppm.
- Acondicionar las columnas para poder realizar mediciones del oxígeno en solución a diferentes alturas de nivel de la columna.
- Realizar las pruebas de columnas a nivel piloto, de acuerdo a la disponibilidad del laboratorio metalúrgico de Minera La Zanja, en columnas de 700 kilogramos para poder comprobar de manera más exacta el aumento en la recuperación.
- Para el caso de las columnas de 700 kilogramos se tendrá que determinar el tiempo óptimo de oxigenación y del número de veces que se tendrá que realizar la inyección y así poder tener una concentración de oxígeno de 20 ppm en solución.
- Siguiendo las secuencias de pruebas, una vez comprobado el efecto del oxígeno en las pruebas a nivel piloto se tiene que proceder a escalar la prueba a nivel industrial en columnas de 30 toneladas del laboratorio metalúrgico de Minera La Zanja.
- Realizar pruebas utilizando generadores de nanoburbujas para determinar una mejor difusión y estabilidad del oxígeno en la solución de cianuro.

## BIBLIOGRAFÍA

1. U.S Geological Survey. (2018). Mineral Commodity Summaries 2018 , Estados Unidos.
2. Tremolada J , Valverde P. & Valverde R. Oxigenación industrial del Oro en procesos de lixiviación en pilas. CIA Minera San Simon & CIA Minera Aurífera Santa Rosa S.A .
3. Marsden, J. & House, I. (1992). The Chemistry of Gold Extraction. West Sussex, England: Ellis Horwood.
4. Srithammavut, W. (2008). Modeling of Gold Cyanidation , Lappeenranta University of Technology , Finlandia.
5. Ellis, S & Seneyake, G. (2004). The Effects of Dissolved Oxygen and Cyanide Dosage on Gold Extraction from a Pyrrhotite-Rich Ore. Hydrometallurgy, Vol 72, pp 39-50.
6. Smith, R.M & A.E Martell. (1976). Critical Stability Constants. Volume 4. New York: Plenum Press.
7. Linares Gutierrez Nataniel Mario. (2008). "Manejo ambiental de residuos de cinauro de oro en laboratorio metalúrgico" , Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna-Peru.
8. Manrique Martínez Jose Antonio, "Manejo de pilas de lixiviación en minera Yanacocha S.R.L " , Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
9. Higuera Cobos Oscar Fabian , Trisancho Reyes Jose Luis , Florez Garcia Luis Carlos. (2007). "Comportamiento anódico de la plata en soluciones cianuradas libres de oxígeno", Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia
10. Esteban Domínguez. (1966-1967). "Hidrometalurgia : fundamentos procesos y aplicaciones , Capítulo 8 : Lixiviación de metales , p.203.

11. Luna Cordova Henry. (2016). Desarrollo de la Minería Aurífera y Argentífera en el Perú
12. Fathi Habashi. (1967). "Kinetics and Mechanisms of Gold and Silver Dissolution in Cyanide Solution", Laval University.
13. Kondos, P.D., Deschênes, G & Morrison, R.M. (1995). Process Optimization Studies in Gold Cyanidation. *Hidrometallurgy*, Vol 39, pp 235-250
14. Ling, P. et al. (1996). An improved Rate Equation for Cyanidation of a Gold Ore. *Canadian Metallurgy Quarterly*, Vol 35, No 3, pp 225-234.
15. Crundwell, F.K & Godorr, S.A. (1997). A Mathematical Model of the Leaching of Gold in Cyanide Solutions, *Hidrometallurgy*. Vol 44, pp 147-162.
16. Marchese, Adolfo. (2003). Optimización del Proceso de Cinauración con Reactivos Químicos, TECSUP, Lima.
17. Cathro, K.J., & A. Walkley. (1961). The Cyanidation of Gold. CSIRO Publication Melbourne, Australia: CSIRO.
18. Cathro, K.J., & D.F.A. Koch (1964). The anodic dissolution of gold in cyanide solutions. *Journal of Electrochemical Society* 111:1416-1920
19. Ball, S.P., A.J. Monhemius, & P.J. Wyborn. (1989). The use of inorganic peroxides as accelerators for gold heap leaching. Page 149-164 in *Precious Metals '89*. Edited by M.C. Jha & S.D. Hill. Warrendale, P.A.: TMS.
20. Norris, R.D., R.A. Brown, & F.E. Carpreso. (1983). The use of peroxygen chemicals in the heap leaching of gold and silver ores. AIME Preprint No. 83-26. Littleton, CO: SME-AIME.
21. Fathi Habashi (1986). Principles of Extractive Metallurgy. Vol 2
22. Ohnari H., Saga T. (1999). "High Functional Characteristics of Microbubbles and Water Purification". *Resources Processing*. 46, Japón: pp 238-244.

23. Burns S., Yiacoumi S., Tsouris C.(1997). "Microbubble generation for environmental and industrial separations" *Separation and Purification Technology*. 11: 221-232.

## ANEXOS



Figura 49. Homogenizado del mineral para el armado de columnas representativo



Figura 50. Armado de columna de lixiviación con mineral homogenizado y cuarteado



Figura 51. Mineral dentro de la columna de lixiviación para pruebas de lixiviación



Figura 52. Bomba peristáltica y cabeza para la dosificación de cianuro





Figura 53. Inyección de oxígeno en solución de cianuro con cerámico de microporos



Figura 54. Contenedores de solución de cianuro y bombas peristálticas para dosificación de cianuro



Figura 55. Columnas en plena prueba de lixiviación con solución de cianuro oxigenada y sin oxigenar



Figura 56. Cerámico de microporos y medidor de presión utilizados en la inyección de oxígeno en solución de cianuro



Figura 57. Cerámico con microporos



Figura 58. Columnas en proceso de lixiviación por goteo